

Grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales  
2016-2017

*Trabajo Fin de Grado*

# “Sonorización del Polideportivo Ignacio Pinedo”

---

Aitor Montes Odriozola

Tutor

Luis Antonio Azpicueta Ruiz

Leganés, 6 de octubre de 2017



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a mi familia, en especial a mis padres, por todo el apoyo recibido desde que decidí venir a Madrid a comenzar mis estudios en el Grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales.

Por supuesto, agradecer a Luis, mi tutor, por su ayuda y por las ideas que ha aportado a lo largo de la realización de este trabajo. Sin él no habría sido posible llevarlo a cabo.

Agradecer a José Javier por su ayuda a la hora de facilitarme el acceso al Polideportivo Ignacio Pinedo y por toda la información aportada acerca del recinto.

También he de agradecer a Pedro, Ignacio y Julio por su ayuda a la hora de realizar las mediciones necesarias para este trabajo.

Por último, agradecer a mis amigos de Ortuella, Zona Minera, Margen Izquierda y alrededores, simplemente por estar ahí cada vez que vuelvo a casa. También agradecer a la gente que he conocido estos años en Madrid por hacer más fácil el hecho de estar fuera de casa.





# Índice

1.	Introducción .....	1
2.	Introducción a las teorías para el estudio del campo sonoro en recintos .....	3
2.1.	Teoría estadística .....	3
2.1.1.	Coeficiente de absorción sonora.....	3
2.1.2.	Campo libre y campo reverberante .....	4
2.1.3.	Tiempo de reverberación .....	6
2.2.	Teoría geométrica .....	8
2.2.1.	Rayo directo y rayos reflejados .....	9
2.2.2.	Tiempo de reverberación .....	9
2.3.	Teoría ondulatoria.....	10
2.3.1.	Modos propios .....	10
2.4.	Teoría psicoacústica .....	13
2.4.1.	Comportamiento del oído .....	13
2.4.2.	Parámetros para medir la inteligibilidad.....	15
3.	Sonorización de recintos cerrados de uso deportivo.....	17
3.1.	Características acústicas de un recinto cerrado de uso deportivo .....	17
3.1.1.	Tiempo de reverberación .....	17
3.1.2.	Ecos, focalizaciones del sonido y ecos flotantes .....	20
3.1.3.	Efecto tambor.....	22
3.1.4.	Ruido de fondo .....	22
3.2.	Requisitos para la sonorización de un recinto cerrado de uso deportivo.....	24
3.2.1.	Inteligibilidad .....	24
3.2.2.	Relación señal/ruido.....	25
3.2.3.	Cobertura uniforme .....	26
3.2.4.	Fidelidad de la señal .....	26
3.3.	Tipos de refuerzos sonoros .....	26
3.3.1.	Sistema centralizado .....	27
3.3.2.	Sistema distribuido.....	30
3.3.3.	Sistema mixto .....	32
4.	Line arrays .....	33
4.1.	Introducción a los line arrays .....	33
4.2.	Suma acústica.....	33
4.2.1.	Suma de señales coherentes.....	33

4.2.2.	Fuente puntual doble .....	35
4.2.3.	Patrón de directividad .....	37
4.3.	Line array.....	38
4.3.1.	Fuente lineal.....	39
4.3.2.	Control de la directividad vertical .....	41
4.3.3.	Ángulo de cobertura vertical.....	41
4.3.4.	Fuente lineal de elementos discretos .....	43
4.3.5.	Configuraciones.....	45
5.	Proceso de modelado del recinto con EASE.....	52
5.1.	Descripción del recinto.....	52
5.2.	Creación del modelo con EASE.....	53
5.3.	Ajuste del modelo .....	57
5.3.1.	Método de ajuste por niveles de presión .....	58
5.3.2.	Procedimiento para el ajuste del modelo .....	58
5.3.3.	Definición de los puntos de medida.....	58
5.3.5.	Obtención y procesado de los datos .....	65
5.3.6.	Ajuste del modelo mediante el cambio de materiales .....	67
6.	Propuesta y simulación de refuerzo sonoro con EASE Focus .....	81
6.1.	Sistema de refuerzo sonoro elegido .....	81
6.1.1.	Refuerzo sonoro para las gradas.....	81
6.1.2.	Refuerzo sonoro para la pista .....	82
6.2.	Creación de las zonas de audiencia.....	82
6.3.	Diseño del refuerzo sonoro .....	84
6.3.1.	Diseño del refuerzo sonoro para las gradas.....	84
6.3.2.	Diseño del refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica .....	94
6.3.3.	Diseño del refuerzo sonoro para las divisiones laterales.....	100
7.	Simulación con EASE del refuerzo sonoro propuesto .....	104
7.1.	Parámetros a simular con EASE.....	104
7.2.	Inserción del refuerzo sonoro en EASE .....	104
7.3.	Tiempos de reverberación .....	106
7.4.	SPL total.....	108
7.4.1.	SPL total en las gradas.....	108
7.4.2.	SPL total en la pista .....	109
7.5.	Parámetros de inteligibilidad .....	119
7.5.1.	%ALCons .....	120
7.5.2.	STI .....	122

7.6.	Análisis de los resultados .....	125
8.	Conclusiones y trabajos futuros .....	127
9.	Marco regulador y entorno socio-económico.....	129
9.1.	Marco regulador.....	129
9.2.	Presupuesto .....	129
9.3.	Impacto socio-económico .....	130
	Bibliografía .....	131

## Índice de figuras

Figura 2.1. Distancia crítica.....	6
Figura 2.2. Reflexión especular.....	8
Figura 2.3. Ecograma.....	10
Figura 2.3. Modos axiales.....	11
Figura 2.4. Modos tangenciales.....	11
Figura 2.5. Modos oblicuos.....	12
Figura 2.6. Curvas isofónicas.....	14
Figura 2.7. Curva de ponderación A.....	14
Figura 2.8. Ábacos utilizados para el cálculo de %ALCons.....	16
Figura 3.1. Enmascaramiento que se produce al emitir una vocal seguida de una consonante.....	17
Figura 3.2. Valores de $RT_{mid}$ recomendados para recintos de uso deportivo.....	18
Figura 3.3. Relación entre el retardo del sonido y la inteligibilidad de la palabra.....	20
Figura 3.4. Concentración del sonido producido por una superficie cóncava.....	21
Figura 3.5. Eco flotante generado al situar una fuente sonora entre dos paredes paralelas reflectantes.....	21
Figura 3.6. Valores de ruido en dB(A) en diferentes tipos de actividades deportivas.....	23
Figura 3.7. Curvas NC (Noise Criteria).....	24
Figura 3.8. Influencia de la relación señal/ruido en el %ALCons.....	25
Figura 3.9. Sistema centralizado del ATT Center Arena de San Antonio.....	27
Figura 3.10. Imagen de uno de los line arrays y uno de los arreglos de subgraves situados alrededor del videomarcador (ATT Center Arena) .....	28
Figura 3.11. Refuerzo sonoro para la pista de juego (ATT Center Arena).....	28
Figura 3.12. Sistema de refuerzo centralizado del Gran Canaria Arena, en Las Palmas de Gran Canaria.....	29
Figura 3.13. Altavoz D.A.S. BiDriver Plus.....	29
Figura 3.14. Sistema distribuido del Complejo Deportivo Felipe VI de Lorca.....	30
Figura 3.15. Orientación de las cajas para proporcionar cobertura tanto a las gradas como a la pista (Complejo Deportivo Felipe VI).....	31
Figura 3.16. Configuración del refuerzo sonoro del polideportivo Horst Korber de Berlín.....	31
Figura 3.17. Imagen de uno de los tres clusters instalados en el polideportivo Horst Korber de Berlín.....	32
Figura 4.1. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 85 Hz.....	35
Figura 4.2. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 42.5 Hz.....	36
Figura 4.3. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 170 Hz.....	37
Figura 4.4. Variación del patrón de directividad en relación al aumento de la separación entre fuentes.....	38
Figura 4.5. Fuente lineal.....	39
Figura 4.6. Diagramas de directividad de una fuente lineal variando la relación entre longitud de la fuente y frecuencia emitida.....	40
Figura 4.7. Diagramas de directividad de una fuente lineal aplicando “tapering” .....	42
Figura 4.8. Distribución no uniforme del nivel de presión sonora con la distancia debida a la aparición de múltiples lóbulos.....	43

Figura 4.9. Distribución uniforme del nivel de presión sonora con la distancia debida a la existencia de un solo lóbulo principal.....	43
Figura 4.10. Aspecto exterior y estructura interna de una caja de line array de la marca Axiom, modelo AX2065P.....	44
Figura 4.11. Altavoz de directividad proporcional del modelo Axiom AX2065P.....	45
Figura 4.12. Ejemplo de configuración de array en curva.....	45
Figura 4.13. Representación geométrica de un array en curva.....	46
Figura 4.14. Diagramas de directividad de un array en curva.....	47
Figura 4.15. Ejemplo de configuración de array en “J” .....	48
Figura 4.16. Diagramas polares a 1 kHz de un line array de 2 metros de longitud, un array en curva con ángulo de sector circular de 60° y radio de 1 metro y el “J” array resultante.....	48
Figura 4.17. Diagramas polares para diferentes frecuencias de un array en “J” .....	49
Figura 4.18. Array en espiral aritmética con $n = 10$ , $L = 5$ y $\Omega = 45^\circ$ .....	50
Figura 4.19. Diagramas polares para diferentes frecuencias de un array en espiral logarítmica con $L = 5$ y $\Omega = 45^\circ$ .....	51
Figura 5.1. Interior del Polideportivo Ignacio Pinedo.....	52
Figura 5.2. Interior del Polideportivo Ignacio Pinedo con las cortinas divisorias desplegadas.....	53
Figura 5.3. Primera versión del modelo creado con EASE.....	54
Figura 5.4. Detalle de los bancos y las escaleras de las gradas.....	54
Figura 5.5. Segunda versión del modelo creado con EASE.....	55
Figura 5.6. Tercera versión del modelo creado con EASE.....	55
Figura 5.7. Aproximación a la forma de las tuberías mediante hexágonos.....	56
Figura 5.8. Versión definitiva del modelo creado con EASE.....	56
Figura 5.9. Vista lateral de la versión definitiva del modelo.....	57
Figura 5.10. Vista en planta de la versión definitiva del modelo.....	57
Figura 5.11. Puntos de medida.....	59
Figura 5.12. Situación en la se encontraban las cortinas divisorias y las canastas de los laterales.....	59
Figura 5.13. Posición en la que se encontraban las canastas de la pista principal durante las mediciones.....	60
Figura 5.14. Fuente dodecaédrica utilizada para las mediciones.....	60
Figura 5.15. Densidad espectral del ruido rosa.....	61
Figura 5.16. Generador de ruido rosa utilizado.....	61
Figura 5.17. Amplificador Crest Audio CA6 utilizado para amplificar la señal de ruido rosa.....	62
Figura 5.18. Sonómetro Bruel&Kjaer 2250 light.....	62
Figura 5.19. Fuente dodecaédrica y analizador sonoro en uno de los puntos de la pista	63
Figura 5.20. Sonómetro situado a 2 m de la fuente.....	64
Figura 5.21. Fuente dodecaédrica y analizador sonoro en la cámara anecoica.....	64
Figura 5.22. Niveles promedio de ruido de fondo por tercio de octava.....	66
Figura 5.23. Valores de SPL a 1 m introducidos en EASE.....	69
Figura 5.24. Configuración de las opciones para el cálculo del Area mapping.....	70
Figura 5.25. Resonador múltiple de cavidad a base de listones.....	71
Figura 5.26. Imagen detallada de los bancos de las gradas.....	72
Figura 5.27. Coeficientes de absorción de LINOLEUM.....	74
Figura 5.28. Coeficientes de absorción de CONCRETE R.....	74
Figura 5.29. Coeficientes de absorción de CONCRETE S.....	74
Figura 5.30. Coeficientes de absorción de CCLY BRICK.....	74
Figura 5.31. Coeficientes de absorción de WIND GLASS.....	74
Figura 5.32. Coeficientes de absorción de WINDOW DP.....	75

Figura 5.33. Coeficientes de absorción de $a=10\%$ .....	75
Figura 5.34. Coeficientes de absorción de TILE,FLOOR.....	75
Figura 5.35. Coeficientes de absorción de STEEL.....	75
Figura 5.36. Coeficientes de absorción de $a=50\%$ .....	76
Figura 5.37. Coeficientes de absorción de WOODFLR LN.....	76
Figura 5.38. Coeficientes de absorción del material utilizado en los bancos de las gradas.....	76
Figura 5.39. Coeficientes de absorción del material utilizado en el techo de la pista y de las pistas de squash.....	76
Figura 5.40. Coeficientes de absorción del material utilizado en las pistas de squash.....	77
Figura 6.1. Zonas de audiencia creadas con EASE Focus.....	83
Figura 6.2. Zona de pista creada con EASE Focus.....	83
Figura 6.3. Zona de las gradas creada con EASE Focus.....	84
Figura 6.4. Unidad del modelo EL 10 de la marca Nova.....	85
Figura 6.5. Estructura de truss utilizada en la sonorización del Pabellón Fuente de San Luis, en Valencia.....	86
Figura 6.6. Configuración del line array compuesto por tres cajas Nova EL 10.....	87
Figura 6.7. Diagramas polares del line array utilizado inicialmente compuesto por tres cajas Nova EL 10.....	87
Figura 6.8. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 500 Hz.....	88
Figura 6.9. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 1 kHz.....	88
Figura 6.10. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 2 kHz.....	88
Figura 6.11. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 4 kHz.....	89
Figura 6.12. Unidad del modelo SR-C8S de la marca TOA.....	89
Figura 6.13. Diagramas polares del line array utilizado compuesto por tres cajas TOA SR-C8S.....	90
Figura 6.14. Configuración final del line array compuesto por tres cajas TOA SR-C8S....	91
Figura 6.15. Ecualización utilizada para cada uno de los line arrays.....	91
Figura 6.16. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 500 Hz.....	91
Figura 6.17. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 1 kHz.....	92
Figura 6.18. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 2 kHz.....	92
Figura 6.19. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 4 kHz.....	92
Figura 6.20. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 500 Hz.....	93
Figura 6.21. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 1 kHz.....	93
Figura 6.22. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 2 kHz.....	93
Figura 6.23. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 4 kHz.....	94
Figura 6.24. Tannoy VX 12.....	94
Figura 6.25. Diagramas polares del modelo VX 12 de Tannoy.....	95
Figura 6.26. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 500 Hz.....	96

Figura 6.27. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 1 kHz.....	97
Figura 6.28. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 2 kHz.....	97
Figura 6.29. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 4 kHz.....	97
Figura 6.30. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.....	98
Figura 6.31. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.....	98
Figura 6.32. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.....	98
Figura 6.33. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 4 kHz.....	99
Figura 6.34. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.....	99
Figura 6.35. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.....	99
Figura 6.36. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.....	100
Figura 6.37. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 4 kHz.....	100
Figura 6.38. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 500 Hz.....	101
Figura 6.39. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 1 kHz.....	101
Figura 6.40. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 2 kHz.....	101
Figura 6.41. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 4 kHz.....	102
Figura 6.42. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 500 Hz.....	102
Figura 6.43. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 1 kHz.....	103
Figura 6.44. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 2 kHz.....	103
Figura 6.45. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 4 kHz.....	103
Figura 7.1. Recinto con los siete line array destinados al refuerzo sonoro de las gradas y las siete cajas utilizadas para la pista.....	105
Figura 7.2. Detalle del refuerzo sonoro de las gradas.....	105
Figura 7.3. Detalle del refuerzo sonoro para las exhibiciones de gimnasia rítmica.....	106
Figura 7.4. Coeficientes de absorción del material utilizado para simular la ocupación de los bancos de las gradas.....	106
Figura 7.5. Tiempos de reverberación obtenidos mediante la expresión de Sabine para el recinto vacío (izquierda) y con las gradas ocupadas (derecha).....	107
Figura 7.6. Tiempos de reverberación obtenidos mediante la expresión de Eyring para el recinto vacío (izquierda) y con las gradas ocupadas (derecha).....	107
Figura 7.7. SPL total en las gradas para la banda de octava de 500 Hz.....	108
Figura 7.8. SPL total en las gradas para la banda de octava de 1 kHz.....	108
Figura 7.9. SPL total en las gradas para la banda de octava de 2 kHz.....	109
Figura 7.10. SPL total en las gradas para la banda de octava de 4 kHz.....	109

Figura 7.11. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.....	110
Figura 7.12. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.....	110
Figura 7.13. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.....	111
Figura 7.14. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.....	111
Figura 7.15. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 500 Hz.....	112
Figura 7.16. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 1 kHz.....	112
Figura 7.17. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 2 kHz.....	113
Figura 7.18. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 4 kHz.....	113
Figura 7.19. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 500 Hz.....	114
Figura 7.20. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 1 kHz.....	114
Figura 7.21. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 2 kHz.....	115
Figura 7.22. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 4 kHz.....	115
Figura 7.23. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 500 Hz.....	116
Figura 7.24. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 1 kHz.....	116
Figura 7.25. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 2 kHz.....	117
Figura 7.26. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 4 kHz.....	117
Figura 7.27. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 500 Hz.....	118
Figura 7.28. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 1 kHz.....	118
Figura 7.29. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 2 kHz.....	119
Figura 7.30. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 4 kHz.....	119
Figura 7.31. Valores de %ALCons para las gradas.....	120
Figura 7.32. Valores de %ALCons para las exhibiciones de gimnasia rítmica.....	120
Figura 7.33. Valores de %ALCons para el tercio central.....	121
Figura 7.34. Valores de %ALCons para el tercio lateral izquierdo.....	121
Figura 7.35. Valores de %ALCons para el tercio lateral derecho.....	122
Figura 7.36. Valores de %ALCons para la pista completa.....	122
Figura 7.37. Valores de STI para las gradas.....	123
Figura 7.38. Valores de STI para las exhibiciones de gimnasia rítmica.....	123
Figura 7.39. Valores de STI para el tercio central.....	124
Figura 7.40. Valores de STI para el tercio lateral izquierdo.....	124
Figura 7.41. Valores de STI para el tercio lateral derecho.....	125
Figura 7.42. Valores de STI para la pista completa.....	125



## Índice de tablas

Tabla 2.1. Calificación de la inteligibilidad en función del índice %ALCons.....	15
Tabla 2.2. Calificación de la inteligibilidad en función del parámetro STI.....	16
Tabla 3.1. Valores recomendados de tiempo de reverberación en un recinto deportivo, según su volumen, para su uso para la competición.....	19
Tabla 3.2. Niveles de ruido existentes en diferentes tipos de eventos deportivos, extraídos de la base de datos Noise Navigator Sound Level Data Base.....	22
Tabla 3.3. Valores de SPL correspondientes a las curvas NC 40 y NC 50.....	23
Tabla 5.1. Niveles promedio de ruido de fondo por tercio de octava.....	66
Tabla 5.2. Valores utilizados para la corrección.....	67
Tabla 5.3. Valores de $L_{Zeq}$ obtenidos 'in situ' en los puntos de medida.....	78
Tabla 5.4. Valores de $L_{Zeq}$ obtenidos en la cámara anecoica con la fuente en funcionamiento, y su correspondiente corrección por distancia.....	67
Tabla 5.5. Valores de incertidumbre expandida obtenidos para las medidas 'in situ'.....	79
Tabla 5.6. Comparación de los valores de $L_{Zeq}$ obtenidos 'in situ' con los valores obtenidos tras el ajuste.....	80
Tabla 5.7. Coeficiente de atenuación del aire.....	73
Tabla 6.1. Niveles de ruido de fondo estimados para las gradas.....	85
Tabla 6.2. Niveles de ruido de fondo estimados para la pista.....	95
Tabla 9.1. Presupuesto del material necesario para llevar a cabo el trabajo.....	129
Tabla 9.2. Presupuesto de la mano de obra necesaria para llevar a cabo el trabajo.....	130
Tabla 9.3. Presupuesto de la realización del trabajo.....	130

# 1. Introducción

El trabajo realizado trata sobre una propuesta de sonorización del Polideportivo Ignacio Pinedo, ubicado en el Centro Deportivo Universidad Carlos III de Madrid, en el campus de Getafe. Como parte importante del trabajo se ha desarrollado un modelo software del recinto que permite simular el comportamiento del mismo, evaluando la bondad de la sonorización propuesta.

El diseño de refuerzos sonoros para recintos cerrados diseñados sin ningún tipo de tratamiento acústico se presenta como un desafío para la persona encargada del diseño, ya que ha de enfrentarse a las características del recinto para lograr cumplir con sus objetivos. Este desafío se presenta, generalmente, a la hora de diseñar un refuerzo sonoro para un recinto deportivo.

Los recintos de estas características son espacios con capacidad de acoger a un gran número de personas, lo que posibilita la celebración no sólo de eventos deportivos, sino también de conciertos, exposiciones, congresos, espectáculos de danza, etc. No obstante, estas posibilidades no se suelen tener en cuenta a la hora de diseñar el recinto, por lo que las condiciones acústicas en su interior limitan su utilidad. Los tiempos de reverberación elevados y la aparición de ecos y focalizaciones de sonido presentan un problema a la hora de realizar una correcta sonorización. A parte de los problemas relacionados con la propia geometría del recinto y los materiales con los que está construido, se presenta el problema del ruido de fondo generado por el público durante las competiciones, que en ocasiones puede llegar a ser excesivo, sobre todo en grandes recintos que acogen deportes multitudinarios.

Por ello, es necesario simular el refuerzo sonoro diseñado en un entorno lo más parecido posible a la realidad, para analizar el campo sonoro que se crea en el interior del recinto y comprobar así sus prestaciones, con el fin de mejorar el diseño hasta lograr alcanzar unos objetivos establecidos. En el caso de un recinto cerrado destinado al uso deportivo, estos objetivos son garantizar una correcta inteligibilidad y una cobertura uniforme tanto en las gradas como en la pista. Es importante, por lo tanto, modelar mediante software un recinto con una geometría y una distribución de materiales que sean lo más parecidos posibles al recinto a sonorizar, así como introducir unos valores de ruido de fondo que simulen las condiciones reales.

El contenido del trabajo se divide en varias partes: una parte teórica, en la que se exponen los conceptos fundamentales en los que se basa este trabajo, una parte más práctica, en la que se llevan a cabo tanto el modelado del recinto como el diseño del refuerzo sonoro y su simulación, y, por último, una parte dedicada al análisis del marco regulador y el entorno socio-económico.

El contenido teórico del trabajo se compone de tres capítulos, en los cuales se desarrollan los conceptos necesarios para poder llevar a cabo el estudio acústico del recinto (Capítulo 2), establecer los objetivos a cumplir con la sonorización (Capítulo 3) y analizar las características técnicas de las agrupaciones de altavoces en línea, más conocidas mediante el término anglosajón line arrays (Capítulo 4).

La siguiente parte del trabajo está dedicada al modelado del recinto (Capítulo 5) y al diseño y simulación del refuerzo sonoro (Capítulos 6 y 7). En primer lugar, se describe detalladamente el proceso seguido para construir mediante el software EASE un modelo del recinto en el cual se va a llevar a cabo la sonorización, para analizar posteriormente las prestaciones del refuerzo

sonoro diseñado en un entorno lo más parecido posible a la realidad. Posteriormente se lleva a cabo el diseño del refuerzo sonoro mediante el software EASE Focus, y por último se analizan los resultados observando su comportamiento en el recinto modelado con EASE, comprobando si se cumplen los objetivos impuestos. Tras la obtención de los resultados se extraen conclusiones y se determinan trabajos futuros (Capítulo 8).

La última parte del trabajo está dedicada al análisis del marco regulador y el entorno socio-económico relacionado con la realización de este trabajo (Capítulo 9).

## **2. Introducción a las teorías para el estudio del campo sonoro en recintos**

### **2.1. Teoría estadística**

Esta teoría considera que las ondas reflejadas en las superficies del interior de un recinto llegan desde todas las direcciones y con todas las fases de manera equiprobable a cualquier punto del mismo. De esta manera, se asume que la densidad de energía sonora en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto. El campo sonoro que cumple con estas condiciones se denomina campo difuso, el cual se obtiene de forma aproximada en una cámara reverberante.

Cuando se conecta una fuente sonora en un recinto, ésta emite ondas sonoras que van reflejándose en las diferentes superficies, perdiendo energía cada vez que se produce un choque. Es decir, cada onda se refleja en una superficie, pierde energía y se redirecciona hacia otra superficie, en la cual también se refleja y pierde energía, así sucesivamente, de manera que la energía va decayendo.

Por lo tanto, cuando cesa la emisión de la fuente, la densidad de energía existente en la sala no se extingue de manera inmediata, sino que ha de pasar cierto tiempo hasta que la pérdida de energía sonora haga que ésta sea inaudible.

#### **2.1.1. Coeficiente de absorción sonora**

Cuando una onda sonora choca con una frontera que separa dos medios, parte de la energía incidente se refleja, y la energía restante es transmitida al segundo medio. Una porción de la energía transmitida al segundo medio se transforma en energía calorífica en la frontera de separación. Este fenómeno se denomina como proceso de absorción acústica.

La energía sonora total incidente  $E_i$  se descompone como:

$$E_i = E_a + E_r + E_t \quad (2.1)$$

siendo  $E_a$  la energía absorbida,  $E_r$  la energía reflejada y  $E_t$  la energía transmitida.

Dividiendo cada miembro de la expresión (2.1) por  $E_i$  se obtiene:

$$1 = \alpha + r + \tau \quad (2.2)$$

siendo:

$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$  el coeficiente de absorción sonora

$r = \frac{E_r}{E_i}$  el coeficiente de reflexión

$\tau = \frac{E_t}{E_i}$  el coeficiente de transmisión

De esta manera quedan definidos los coeficientes de absorción sonora ( $\alpha$ ), reflexión ( $r$ ) y transmisión ( $\tau$ ).

A partir del coeficiente de absorción sonora se puede calcular el coeficiente medio de absorción sonora de un recinto:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2.3)$$

siendo  $S_i$  las áreas de las diferentes superficies interiores,  $S$  el área total del recinto y  $\alpha_i$  los coeficientes de absorción sonora de cada superficie.

Se puede obtener la absorción total del recinto, también denominada como área de absorción equivalente, como:

$$A = \bar{\alpha} S \quad (2.4)$$

### **2.1.2. Campo libre y campo reverberante**

Cuando una fuente emite ondas acústicas en el interior de un recinto, en éste se crean dos campos sonoros: el campo libre y el campo reverberante.

Con campo libre se define la situación en la que el sonido es irradiado desde la fuente sin encontrar obstáculos en su propagación. Dentro del campo libre se distinguen dos partes diferenciadas: el campo próximo y el campo lejano. El campo próximo se produce en las inmediaciones de la fuente y se caracteriza porque el frente de onda esférico no está aún formado. En el campo lejano la radiación ya es esférica y cumple la ley de divergencia esférica, por la cual el nivel de presión sonora disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia entre fuente y receptor. La condición de campo libre se simula en una cámara anecoica.

Si la fuente emisora se encuentra en un recinto, las ondas sonoras encuentran superficies en su propagación, reflejándose en ellas y creando lo que se denomina campo reverberante.

Cuando este campo reverberante cumple con las siguientes proposiciones:

1. Las ondas reflejadas llegan de manera equiprobable a todos los puntos del interior del recinto desde diferentes direcciones y con cualquier fase.
2. La energía sonora en un punto se obtiene mediante la suma aritmética de los valores medios de las energías de las reflexiones que pasan a través de ese punto.
3. La densidad de energía sonora en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto dentro del recinto.

se puede hablar de campo difuso.

La presión directa emitida por la fuente se puede calcular como:

$$p_d = \sqrt{P_A \rho_0 c \frac{Q(\theta, \phi)}{4\pi r^2}} \quad (2.5)$$

donde:

$P_A$  es la potencia acústica de la fuente emisora, en vatios (W)

$\rho_0 c$  es la impedancia característica del medio

$Q(\theta, \phi)$  es el factor de directividad de la fuente, dependiente de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$

$r$  es la distancia en metros entre la fuente emisora y el receptor

De esta esta expresión se puede obtener el nivel de presión sonora directa emitida por la fuente:

$$L_d = 10 \log \left( \frac{p_d^2}{p_{ref}^2} \right) \quad (2.6)$$

siendo  $p_{ref}$  la presión de referencia, de valor  $2 \times 10^{-5}$  pascales (Pa).

Desarrollando la expresión (2.6) se puede definir el nivel de presión directa emitido por la fuente como:

$$L_d = L_W + 10 \log \left( \frac{Q(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \right) \quad (2.7)$$

donde  $L_W$  es el nivel de potencia acústica del altavoz:

$$L_W = 10 \log \frac{P_A}{P_{Aref}} \quad (2.8)$$

siendo  $P_{Aref}$  la potencia acústica de referencia, de valor  $10^{-12}$  vatios (W).

La presión sonora en campo reverberante se obtiene mediante la expresión:

$$p_r = \sqrt{P_A \rho_0 c \frac{4}{R}} \quad (2.9)$$

siendo  $R$  la constante del recinto:

$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (2.10)$$

donde  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente medio de absorción y  $S$  la superficie del recinto.

De la expresión (2.9) se obtiene el nivel de presión sonora en campo reverberante:

$$L_r = L_W + 10 \log \left( \frac{4}{R} \right) \quad (2.11)$$

El nivel de presión sonora total en el recinto, resultante de la suma incoherente del nivel de presión directo y el reverberante, se calcula con la ecuación de Hopkins-Stryker:

$$L_t = L_W + 10 \log \left( \frac{Q(\theta, \phi)}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.12)$$

A partir de aquí se puede definir el concepto de distancia crítica, que es la distancia a la fuente a la cual el nivel de presión sonora debido al campo directo es igual al originado por el campo reverberante:

$$r_c = \sqrt{\frac{RQ(\theta, \phi)}{16\pi}} \quad (2.13)$$

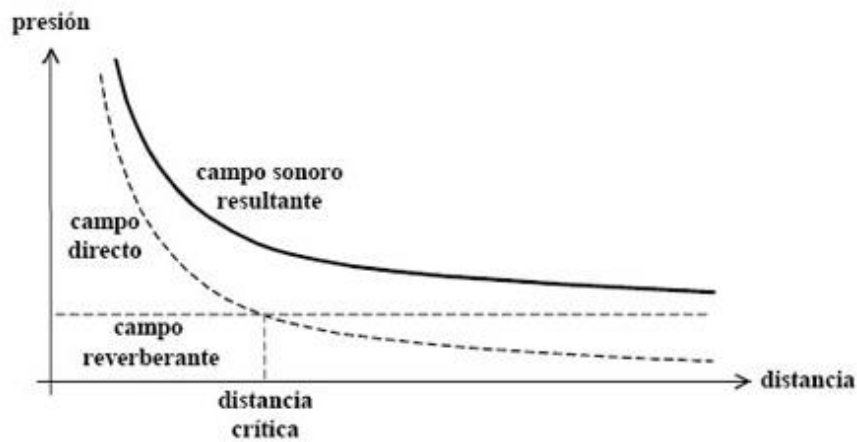


Figura 2.1. Distancia crítica.

### 2.1.3. Tiempo de reverberación

Se define el tiempo de reverberación ( $RT$ ) como el tiempo que tarda la energía sonora en decaer 60 dB dentro de un recinto una vez la fuente sonora ha sido desconectada. Diversos autores han formulado expresiones para calcular este tiempo que transcurre una vez la fuente ha dejado de radiar, y cada una de ellas se aproximará más a la situación real dependiendo de las características del recinto a estudiar. A continuación, se exponen algunas de estas aproximaciones.

#### - Sabine

La fórmula expresada por W. C. Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación es:

$$RT = \frac{0.161 V}{A} \quad (2.14)$$

siendo  $A$  el área de absorción equivalente del recinto, obtenido mediante la expresión (2.4) y  $V$  es el volumen del recinto.

Esta expresión se aproxima más a la realidad si los coeficientes de absorción de las diferentes superficies interiores tienen un valor aproximado y el coeficiente medio de absorción sonora es menor que 0.2. A medida que el recinto se vuelve más absorbente los resultados obtenidos mediante esta expresión son más inexactos.

- Eyring

Eyring desarrolló una aproximación que tuviese validez cuando en el recinto existe una elevada absorción:

$$RT = \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.15)$$

donde  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente medio de absorción sonora, obtenido mediante la expresión (2.3).

Esta aproximación de Eyring es más exacta cuando las superficies interiores del recinto tienen unos coeficientes de absorción de valores aproximados y el coeficiente medio de absorción sonora es superior a 0.2.

- Millington y Sette

La teoría de Millington y Sette ofrece otra expresión diferente para calcular el tiempo de reverberación, y fue desarrollada con intención de solucionar el problema de las teorías anteriores formuladas por Sabine y Eyring, que fueron elaboradas asumiendo una distribución uniforme de material absorbente. La aproximación de Millington y Sette se expresa como:

$$RT = \frac{0.161 V}{-\sum S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.16)$$

donde  $S_i$  es el área del material  $i$ ésimo y  $\alpha_i$  el coeficiente de absorción del material  $i$ ésimo.

Esta teoría ofrece una mejor aproximación que las aproximaciones desarrolladas por Sabine y Eyring para recintos cuya variedad de materiales es muy grande y la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción también.

- Arau

La teoría propuesta por Higini Arau tiene en cuenta la distribución no uniforme de material absorbente en el recinto:

$$RT = \left[ \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{S_x/S} \left[ \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{S_y/S} \left[ \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{S_z/S} \quad (2.17)$$



siendo:

$S_x$  el área de techo y suelo ( $S_x = S_{x1} + S_{x2}$ ),

$S_y$  el área de las paredes laterales ( $S_y = S_{y1} + S_{y2}$ )

$S_z$  el área de las paredes frontal y del fondo ( $S_z = S_{z1} + S_{z2}$ )

$$S = S_x + S_y + S_z$$

$$\bar{\alpha}_x = \frac{S_{x1} \bar{\alpha}_{x1} + S_{x2} \bar{\alpha}_{x2}}{S_x}$$

$$\bar{\alpha}_y = \frac{S_{y1} \bar{\alpha}_{y1} + S_{y2} \bar{\alpha}_{y2}}{S_y}$$

$$\bar{\alpha}_z = \frac{S_{z1} \bar{\alpha}_{z1} + S_{z2} \bar{\alpha}_{z2}}{S_z}$$

## 2.2. Teoría geométrica

La teoría geométrica asume la onda sonora emitida desde la fuente como un conjunto de rayos que se propagan en la misma dirección que dicha onda, donde la energía de cada rayo depende del número de rayos considerados y de las características directivas de la fuente sonora. Esta teoría se basa en la hipótesis de las reflexiones especulares, para la cual se aplican las siguientes reglas para los rayos incidente y reflejado con respecto a la normal a la superficie reflectora:

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie reflectante en el punto de incidencia se encuentran en el mismo plano.
2. El ángulo formado entre el rayo incidente y la normal (ángulo de incidencia) es igual al ángulo existente entre el rayo reflejado y la normal (ángulo de reflexión).

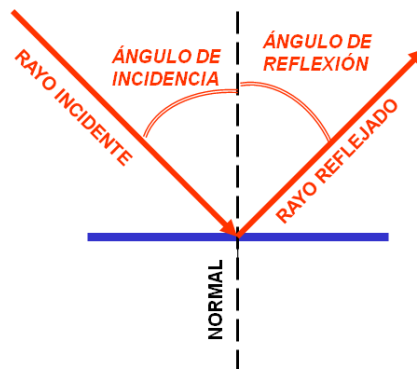


Figura 2.2. Reflexión especular.

Para que en la práctica se produzca una reflexión especular es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

1. La superficie reflectora ha de ser lisa y muy reflectante.
2. Las dimensiones del obstáculo han de ser grandes en comparación con la longitud de onda del sonido. Si las dimensiones son menores o similares a la longitud de onda, la

onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo no existiese (difracción).

Además, si la superficie reflectora presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda en múltiples direcciones (difusión).

### **2.2.1. Rayo directo y rayos reflejados**

Cuando la fuente emite un sonido, la energía llega al observador tanto por el camino directo como por las múltiples reflexiones producidas en el interior del recinto. Estas reflexiones van a llegar desde diferentes direcciones y con diferentes retardos, dependiendo del camino que siga cada una de ellas. Estos retardos se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$\Delta t_k = \frac{l_k - l_0}{c} \quad (2.18)$$

siendo  $l_0$  la distancia recorrida por el rayo directo,  $l_k$  la distancia recorrida por un rayo que ha sufrido  $k$  reflexiones antes de llegar al punto de observación y  $c$  la velocidad del sonido.

Cada uno de los rayos reflejados sufre una atenuación de su energía debida a diversos factores:

- Divergencia esférica.
- Atenuación en la propagación.
- Intersección de los rayos sonoros con las superficies absorbentes que se encuentra durante su propagación.

### **2.2.2. Tiempo de reverberación**

Como se ha visto en el apartado dedicado a la teoría estadística, para ésta poder ser aplicada es necesario que en la sala se den unas condiciones de campo difuso. Si se observa la distribución temporal de las reflexiones, tras el sonido directo aparecen las primeras reflexiones, las cuales están separadas en el tiempo, y transcurrido un tiempo la densidad de las reflexiones aumenta llegándose a solapar. Por lo tanto, los rayos de primeros órdenes de reflexión excluyen la posibilidad de distribución regular del campo acústico, de manera que no se puede utilizar la teoría estadística para su modelado. En cambio, después de las primeras reflexiones aparecen los rayos de órdenes de reflexión superiores, creándose las condiciones necesarias para la distribución regular del campo, lo que permite ya aplicar la teoría estadística.

De esta manera, se puede dividir el proceso de propagación sonora en dos partes diferenciadas. La primera finaliza al término de las reflexiones de los primeros órdenes de reflexión (de segundo orden, por ejemplo), y queda definida por el tiempo  $T_1$ . La segunda parte transcurre desde que se densifican las reflexiones hasta que la densidad de energía disminuye 60 dB con respecto al rayo directo, y queda definida por el tiempo  $T_2$ . Para el cálculo de  $T_1$  se utilizará por tanto la teoría geométrica y para  $T_2$  la teoría estadística.

El tiempo  $T_1$  se puede calcular como (considerando una reflexión de orden 2):

$$T_1 = \frac{l_2 - l_0}{c} \quad (2.19)$$

Esta expresión indica el tiempo transcurrido entre la llegada del rayo directo y la llegada del último rayo de orden 2.

El tiempo  $T_2$  abarca desde el final de las reflexiones de segundo orden hasta que la energía sonora disminuye 60 dB con respecto al rayo directo, y se denomina cola reverberante.

De esta manera, el tiempo de reverberación será:

$$RT = T_1 + T_2 \quad (2.20)$$

El proceso de disminución de energía en un recinto se representa mediante un ecograma, que es una representación gráfica temporal de la llegada de las diferentes reflexiones hasta el punto de observación y de la energía correspondiente a cada una de ellas.

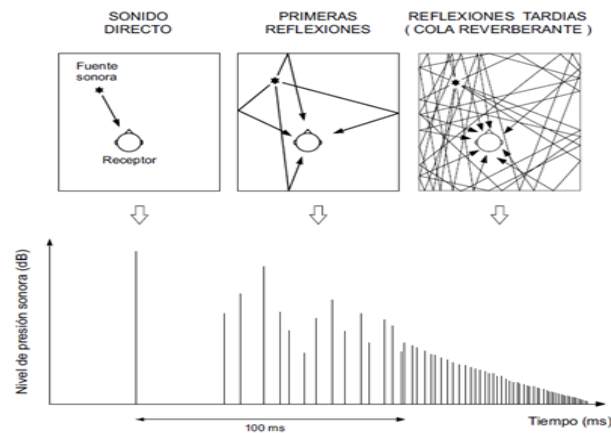


Figura 2.3. Ecograma.

## 2.3. Teoría ondulatoria

Así como las teorías estadística y geométrica se basan en idealizaciones del campo sonoro para poder llevar a cabo un análisis del mismo, la teoría ondulatoria estudia el proceso físico real de vibración de las partículas de aire que tiene lugar en su interior.

Cuando una fuente sonora emite en el interior de un recinto, se origina un proceso vibratorio. Las ondas sonoras se propagan incidiendo y reflejándose en las superficies que delimitan el contorno de la sala, y se crea un sistema de ondas estacionarias. Las ondas estacionarias cuyas longitudes de onda guardan una determinada relación con las dimensiones del recinto crean los modos propios. En la teoría ondulatoria, el tiempo de reverberación está relacionado con el decaimiento de energía de estos modos propios.

### 2.3.1. Modos propios

Las frecuencias de resonancia o modos propios de una sala dependen de la geometría de la misma. Cuando una onda emitida por la fuente sonora tiene una frecuencia que coincide con una de las frecuencias de resonancia de la sala, ésta se amplifica, y cuando la fuente cesa su emisión, la resonancia hace que se retarde la extinción del sonido en dicha frecuencia.

Las frecuencias propias vienen dadas por:

$$f = \frac{c k}{2 \pi} = \frac{c}{2} \left[ \left( \frac{m}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n}{l_y} \right)^2 + \left( \frac{l}{l_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

siendo  $c$  la velocidad del sonido,  $m, n, l = 0, 1, 2, 3, \dots$  y  $l_x, l_y, l_z$  las dimensiones del recinto (longitud, anchura y altura respectivamente).

Existen tres tipos de modos propios:

- Modos axiales: cuando la reflexión se produce entre dos superficies, por ejemplo, cuando  $m = n = 0$  y  $l \neq 0$ .
- Modos tangenciales: cuando la reflexión se da lugar entre cuatro superficies, por ejemplo, cuando  $m = 0$  y  $n, l \neq 0$ .
- Modos oblicuos: cuando la reflexión se produce entre todas las superficies del recinto, por ejemplo, cuando  $m, n, l \neq 0$ .

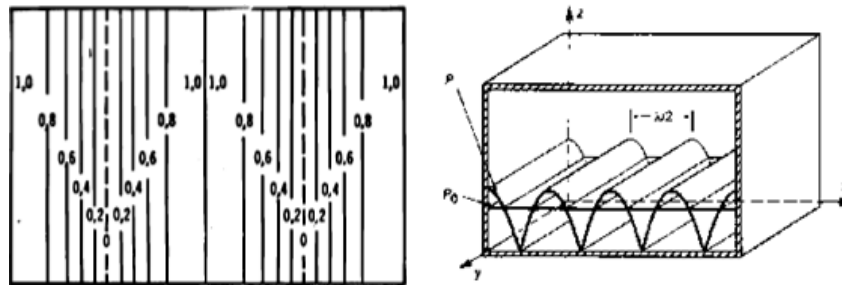


Figura 2.3. Modos axiales. En la figura de la izquierda se representa el modo axial  $(2, 0, 0)$  con la distribución de niveles de presión sonora normalizados. En la figura de la izquierda se muestra la distribución de presión sonora en el modo axial  $(4, 0, 0)$ .

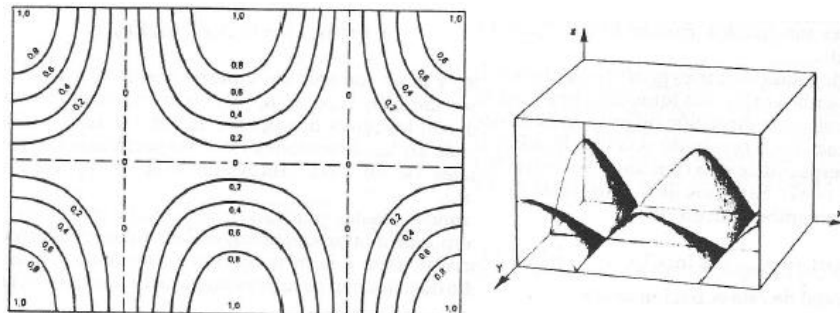
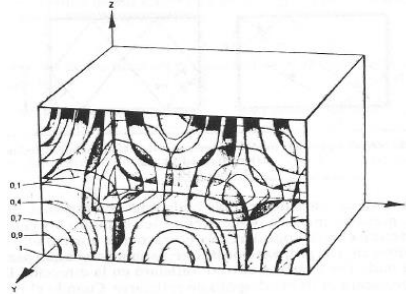


Figura 2.4. Modos tangenciales. Representación de los contornos de la presión sonora (figura de la izquierda) y la distribución de la presión sonora (figura de la derecha) del modo tangencial  $(2, 1, 0)$ .



*Figura 2.5. Modos oblicuos. Representación de la distribución de la presión sonora para el modo oblicuo (2, 1, 1).*

La representación de las distribuciones del nivel de presión para cada tipo de modo muestra que los niveles máximos de presión se concentran en las esquinas del recinto.

La frecuencia de corte de la sala, es decir, la frecuencia de resonancia más baja, se puede hallar como:

$$f_c = \frac{c}{2 l_{max}} \quad (2.22)$$

siendo  $l_{max}$  la longitud máxima del recinto.

Conforme aumentan los índices  $m$ ,  $n$  y  $l$  la densidad de modos propios de la sala crece, y en consecuencia cuanto menor es la frecuencia de corte antes empieza a ser continuo dicho crecimiento.

La simetría del recinto da lugar a los modos degenerados, esto es, mismas frecuencias de resonancia para diferentes valores de los índices  $m$ ,  $n$  y  $l$ . Esto origina que el campo sonoro no sea uniforme, lo cual no es deseable, puesto que va a haber frecuencias que van a ser muy realizadas y el resto no. Esta situación se dará cuando las dimensiones del recinto sean simétricas ( $l_x = l_y = l_z$ ) o si sus longitudes son múltiplos unas de otras, ya que para diferentes valores de los índices  $m$ ,  $n$  y  $l$  la frecuencia resonante resultante va a ser la misma. Por ejemplo, si las dimensiones del recinto son iguales, la frecuencia de resonancia va a ser la misma para  $m = 1, n = l = 0$  que cuando  $n = 1, m = l = 0$  y cuando  $l = 1, m = n = 0$ .

La densidad del espectro de frecuencias propias (el número de modos propios  $\Delta_n$ ) en el intervalo de  $f_n$  a  $f_n + \Delta f_n$  viene dada por:

$$\Delta_n = \left[ \frac{4\pi V}{c^3} f_n^2 + \frac{\pi S}{c^2} f_n + \frac{L}{8c} \right] \Delta f_n \quad (2.23)$$

siendo:

$V$  el volumen del recinto ( $m^3$ )

$S$  la superficie total de las paredes ( $m^2$ )

$L$  la suma de todas las aristas ( $m$ )

Esto implica, por un lado, que cuando aumenta la frecuencia aumenta el número de frecuencias propias (se incrementa la densidad) y que a bajas frecuencias las frecuencias propias están muy

separadas entre sí. Otra consecuencia es que cuanto mayores son las dimensiones del recinto aumenta también la densidad de los modos propios.

Lo deseable es una respuesta del recinto lo más plana posible, con un número elevado de frecuencias propias y con una distribución regular de las mismas, para que sean muchas las frecuencias que sean realizadas y así el campo sonoro sea más uniforme.

Con lo visto anteriormente se puede deducir que en los recintos grandes hay una mayor densidad espectral, incluso a bajas frecuencias, y a altas frecuencias el espectro es prácticamente continuo, por lo que el campo sonoro es uniforme. En cambio, para recintos muy pequeños y a bajas frecuencias, la densidad del espectro sonoro de las frecuencias propias es pequeño, lo cual origina un campo sonoro desigual. Además, si las dimensiones de la sala guardan relación entre sí, esto dará lugar a diferentes modos propios con las mismas frecuencias de resonancia, creando un campo sonoro más irregular.

## **2.4. Teoría psicoacústica**

Las teorías estadística, geométrica y ondulatoria abarcan el estudio de las propiedades físicas de la acústica de recintos. Sin embargo, al final es el oyente quien debe juzgar si la acústica es la apropiada o no. Por ello, es importante conocer cómo se comporta nuestro oído ante el sonido. Por otra parte, es importante establecer parámetros que describan la acústica de un recinto desde el punto de vista de la psicoacústica, como, por ejemplo, los que se basan en la inteligibilidad de la palabra dentro del propio recinto.

### **2.4.1. Comportamiento del oído**

#### **- Sensibilidad del oído en función de la frecuencia**

El oído humano no se comporta de una forma lineal para todo el espectro audible, el cual abarca desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, sino que presenta una sensibilidad diferente dependiente de la frecuencia. El oído es menos sensible a las frecuencias graves, y es necesario un mayor nivel de presión sonora en estas frecuencias para que proporcionen una sensación de sonoridad (sensación subjetiva de nivel sonoro) igual a la de, por ejemplo, un tono de 1 kHz. Este comportamiento no lineal se presenta también a altas frecuencias. Las diferencias de sonoridad son mayores cuando el nivel de presión sonora es bajo, y conforme éste aumenta, las diferencias disminuyen.

Para representar esta relación entre sonoridad y frecuencia se utilizan las curvas isofónicas, las cuales indican, para las frecuencias del espectro audible, los niveles de presión que generan la misma sensación de nivel sonoro.

Se establece una unidad, los fonios, para indicar el nivel de sonoridad de un sonido. El fonio toma como referencia el nivel de presión sonora del tono puro de 1 kHz. Analizando las curvas isofónicas (Figura 2.5) se puede ver que, por ejemplo, un tono de 100 Hz tiene que tener un nivel de presión sonora de 30 dB para que cause la misma sensación subjetiva de nivel sonoro que un tono de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 10 dB.

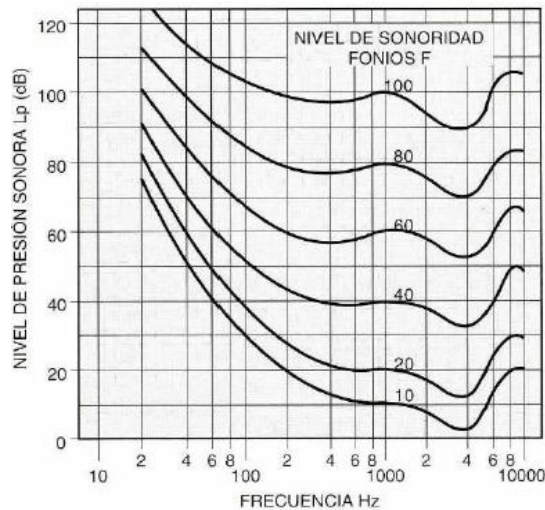


Figura 2.6. Curvas isofónicas.

Con el fin de ajustar algunas medidas de niveles de presión sonora a como se perciben subjetivamente, se emplea la curva de ponderación A (Figura 2.6), la cual corrige el nivel obtenido en cada banda de frecuencias de manera que la medida obtenida se asemeje más a como se percibe realmente. Esta curva mantiene sin corrección el tono de 1 kHz, ya que es el tono de referencia.

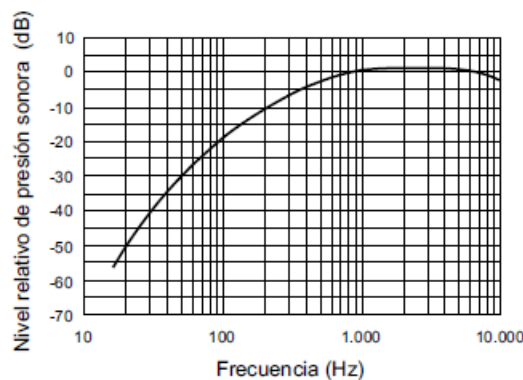


Figura 2.7. Curva de ponderación A.

#### - Bandas críticas

El funcionamiento del oído humano se puede considerar como un conjunto de filtros paso banda en paralelo, cuyo ancho de banda se denomina ancho de banda crítico.

#### - Enmascaramiento frecuencial

El enmascaramiento es el proceso mediante el cual un tono deja de ser perceptible a causa de otro tono o de una banda estrecha de ruido cercanos en el espectro de frecuencias. A niveles bajos de presión sonora el enmascaramiento afecta tan solo a una banda estrecha alrededor de la frecuencia central del tono o banda de ruido que lo provocan, y conforme aumenta el nivel de presión la banda alrededor de la frecuencia central va aumentando. Además, este efecto de enmascaramiento no es simétrico respecto a la frecuencia central, sino que afecta más a las frecuencias que están por encima de ésta.

## 2.4.2. Parámetros para medir la inteligibilidad

### - %ALCons (Percentage Articulation Loss of Consonants)

Este parámetro mide la inteligibilidad de la palabra basándose en el porcentaje de pérdidas de articulación de consonantes. Se basa en la banda de 1/3 de octava centrada en 2 kHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

$$\%ALCons = \frac{n^{\circ} \text{ de consonantes no entendidas}}{n^{\circ} \text{ de consonantes emitidas}} \times 100 \quad (2.24)$$

Se puede calificar la inteligibilidad dentro de un recinto dependiendo del valor del %ALCons de la siguiente manera:

%ALCons	Calificación
0%-10%	Muy bueno
10%-15%	Bueno
15%-100%	Insuficiente

*Tabla 2.1. Calificación de la inteligibilidad en función del índice %ALCons.*

Los parámetros que influyen en el %ALCons son:

- Tiempo de reverberación
- Relación entre nivel reverberante ( $L_r$ ) y nivel directo ( $L_d$ ), relacionada con la posición en la que se encuentra el oyente
- Relación señal/ruido

El %ALCons se puede calcular mediante los ábacos mostrados en la Figura 2.7. En la parte izquierda del ábaco están representados el tiempo de reverberación en el eje de ordenadas y la relación entre nivel reverberante y nivel directo en el eje de abscisas. Esta relación de niveles indica también la posición del oyente con respecto al emisor. Un nivel de 0 dB de relación entre nivel reverberante y nivel directo indica que el oyente se encuentra en el punto de distancia crítica.

La parte derecha del ábaco incluye en el cálculo la relación señal/ruido de pico, representada en el eje de abscisas. La relación señal/ruido de pico se obtiene sumando 10 dB al nivel de relación señal/ruido.

Para obtener unos valores de %ALCons que garanticen una inteligibilidad aceptable, es necesario que tanto el tiempo de reverberación del recinto como la relación entre el nivel reverberante y el directo sean suficientemente bajos, y que haya un nivel suficientemente alto de relación señal/ruido.

La distancia límite entre oyente y emisor queda determinada por la relación entre nivel reverberante y directo, y se encuentra en el punto en el que esta relación alcanza el valor de 10 dB. A partir de este punto la inteligibilidad no se ve empeorada.

En cuanto a la influencia de la relación señal/ruido, a partir de los 35 dB de relación señal/ruido de pico la inteligibilidad no mejora aunque aumente el valor de dicha relación.



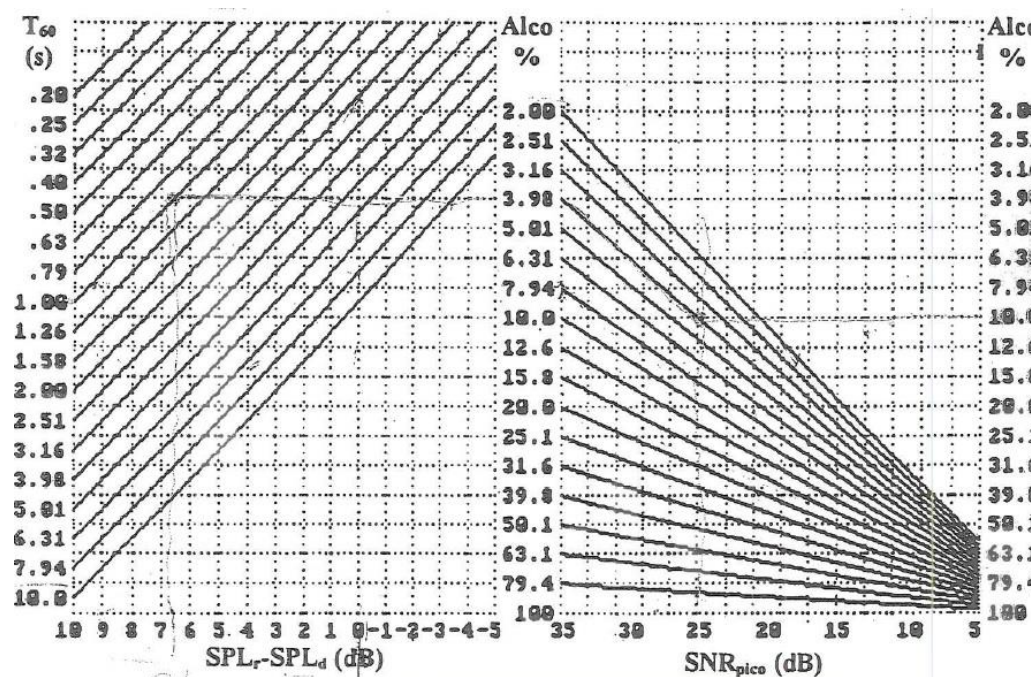


Figura 2.8. Ábacos utilizados para el cálculo de %ALCons.

- STI (Speech Transmission Index)

Este parámetro indica el índice de transmisión de la palabra, y tiene en cuenta el ruido de fondo y la reverberación. El rango de frecuencias utilizado para el cálculo del STI abarca desde la banda de octava de 125 Hz hasta la banda de octava de 4 kHz. El valor puede oscilar entre “0”, lo cual indicaría una inteligibilidad nula, y “1”, que indica una inteligibilidad total. El parámetro STI se puede obtener mediante los analizadores sonoros.

La inteligibilidad se puede clasificar mediante el parámetro STI de la siguiente manera:

Mala	$0 < \text{STI} < 0.30$
Insuficiente	$0.30 < \text{STI} < 0.45$
Media	$0.45 < \text{STI} < 0.60$
Buena	$0.60 < \text{STI} < 0.75$
Excelente	$0.75 < \text{STI} < 1$

Tabla 2.2. Calificación de la inteligibilidad en función del parámetro STI.

- RASTI (Rapid Speech Transmission Index)

Se trata de un índice simplificado del STI. En este caso, las bandas de octava que se tienen en cuenta para su cálculo son las de 500 Hz y 2 kHz.

### 3. Sonorización de recintos cerrados de uso deportivo

#### 3.1. Características acústicas de un recinto cerrado de uso deportivo

Por lo general, los recintos cerrados de uso deportivo son espacios con capacidad de acoger a un gran número de personas. Esto ofrece la posibilidad de realizar muchos tipos de eventos a parte de los propiamente deportivos, como por ejemplo conciertos, exposiciones, congresos...

El problema es que raramente se considera durante el diseño la posibilidad de albergar estos eventos, por lo que la mala acústica de este tipo de recintos reduce su usabilidad.

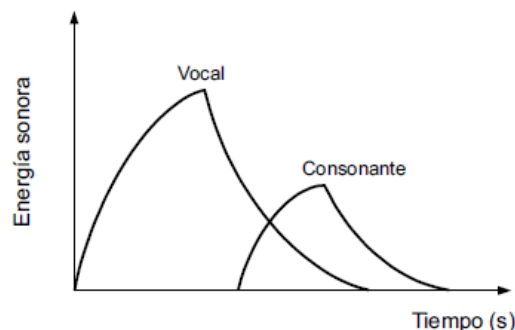
Los principales factores que influyen en el comportamiento acústico de un recinto cerrado destinado al uso deportivo son las superficies reflectantes y la geometría del propio recinto.

##### 3.1.1. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el parámetro más usado y el más indicativo para describir la calidad acústica de un recinto deportivo.

Al tratarse de recintos de un volumen relativamente grande y normalmente con materiales sin ningún tipo de tratamiento acústico para controlar su absorción, el tiempo de reverberación es muy alto, lo cual afecta especialmente a la inteligibilidad de la palabra, debido a la alta contribución de las consonantes a dicha inteligibilidad.

La duración promedio de una vocal está en torno a los 90 ms, mientras que en el caso de una consonante es de unos 20 ms. Por otra parte, el nivel de presión sonora de las vocales es superior al de las consonantes, y su contenido en frecuencia es más alto en bajas frecuencias, mientras que en las consonantes el contenido es más alto en altas frecuencias, lo que ayuda a la inteligibilidad.



*Figura 3.1. Enmascaramiento que se produce al emitir una vocal seguida de una consonante.*

El problema es que un nivel demasiado elevado de tiempo de reverberación hace que el tiempo de decaimiento de la vocal sea aún mayor que en condiciones de campo libre. Esto, unido al

hecho de que la vocal tiene un mayor contenido a frecuencias bajas y un mayor nivel de presión sonora, produce un enmascaramiento de la consonante. Este enmascaramiento de las consonantes hace que disminuya la inteligibilidad.

### 3.1.1.1. Valores recomendados de tiempo de reverberación

Existen diferentes criterios a seguir en cuanto a los valores de tiempo de reverberación recomendados para los recintos cerrados de uso deportivo, variando en función de los autores o de las diferentes normas existentes. A continuación se exponen algunos de estos criterios.

Antoni Carrión Isbert (1998) establece unos valores recomendados del valor promedio del tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ ) que garanticen unas condiciones acústicas suficientemente buenas dependiendo del tipo de recinto y del volumen de éste. El valor promedio del tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ ) se calcula como:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2} \quad (3.1)$$

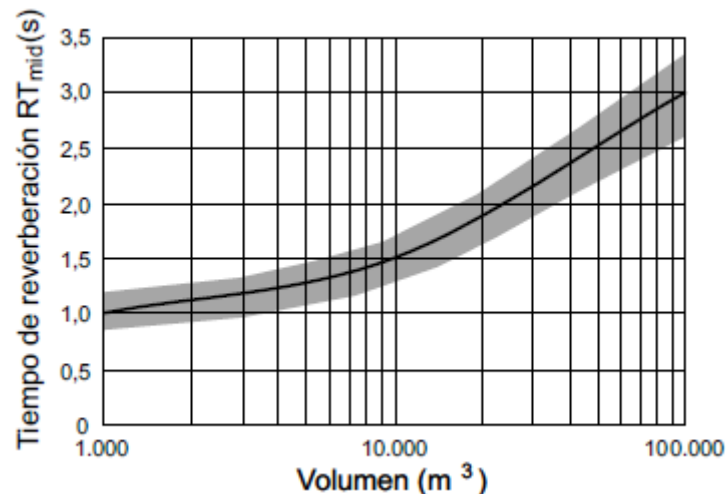


Figura 3.2. Valores de  $RT_{mid}$  recomendados para recintos de uso deportivo.

Por ejemplo, se puede observar en la Figura 3.2 que en el caso de un recinto deportivo de gran volumen (entre 1000 y 100000  $m^3$ ) el valor promedio del tiempo de reverberación ha de estar entre:

$$1s \leq RT_{mid} \leq 3s$$

La norma DIN 18041:2004-05 (Calidad acústica en recintos medianos y pequeños), indica dos valores de tiempo de reverberación recomendados para recintos deportivos dependiendo del tipo de uso:

$$RT = 1.27 \log(V) - 2.49 \quad (3.2)$$

$$RT = 0.95 \log(V) - 1.74 \quad (3.3)$$

siendo  $V$  el volumen del recinto.

La primera expresión (3.2) se aplica cuando en el recinto se está llevando a cabo una sola actividad deportiva y la segunda (3.3) cuando en el recinto se están llevando a cabo varias actividades deportivas al mismo tiempo.

Estas dos expresiones sólo son válidas para recintos deportivos con volúmenes comprendidos entre 2000 y 8500  $m^3$ .

Otra recomendación sobre valores de tiempos de reverberación recomendados se puede encontrar en el *Building Bulletin 93: Acoustic Design of Schools* (2003), una guía para el diseño de espacios escolares en Reino Unido. En este caso se establece como parámetro el tiempo de reverberación a frecuencias medias  $RT_{mf}$ , definido como la media aritmética de los tiempos de reverberación en las bandas de octava de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. El valor recomendado de este parámetro para recintos deportivos cerrados y gimnasios en espacios escolares es de menos de 1.5 s.

En Holanda, desde 2005, existen dos normas que establecen los valores límite de tiempo de reverberación para recintos deportivos. Una norma se aplica para competiciones y otra para uso escolar. Se establece un valor máximo de tiempo de reverberación  $RT_{20}^1$  promediado sobre 6 bandas de octava (desde 125 Hz hasta 4 kHz) y dependiente del volumen del recinto.

$V_{min}(m^3)$	$V_{max}(m^3)$	$RT_{20}$ promedio (s)
-	1700	1.0
1701	2100	1.1
2101	2400	1.2
2401	3200	1.3
3201	4350	1.4
4351	6300	1.5
6301	7400	1.7
7401	9500	1.8
9501	12400	1.9
12401	17250	2.0
17251	29000	2.3
>29000		$2V/3S$ (V=volumen, S=superficie)

Tabla 3.1. Valores recomendados de tiempo de reverberación en un recinto deportivo, según su volumen, para su uso para la competición.

### 3.1.1.2. Disminución del tiempo de reverberación

Para conseguir una disminución del tiempo de reverberación es necesario realizar un tratamiento acústico al recinto en cuestión, mediante la utilización de materiales absorbentes. La situación ideal sería tener en cuenta la acústica del recinto en el proceso de diseño del mismo, para utilizar materiales con cierto grado de absorción que ayuden a una extinción más rápida del campo sonoro, pero por lo general esto no se tiene en cuenta, sobre todo en recintos de construcción más antigua, por lo que es necesario un acondicionamiento a posteriori, en caso de ser posible.

<sup>1</sup> Se define  $RT_{20}$  como el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en decaer 20 dB, y se obtiene midiendo el tiempo que transcurre desde que la curva decae desde 5 dB hasta 25 dB con respecto al nivel inicial y multiplicando este valor por 3.

Un factor que influye mucho en el nivel de absorción de un recinto es la zona de audiencia, ya que las condiciones acústicas varían en función de si el recinto está muy concurrido o no. Esto se debe al coeficiente de absorción de las personas. Un correcto diseño de un recinto que pueda albergar todo tipo de espectáculos, como conciertos, conferencias, etc., debería tener en cuenta este aspecto. De hecho, en los cines y en los teatros los asientos del público están fabricados con materiales con un coeficiente de absorción similar al de las personas, de manera que se minimiza la diferencia del tiempo de reverberación dependiendo de si la sala está llena o no.

### 3.1.2. Ecos, focalizaciones del sonido y ecos flotantes

Otra consecuencia negativa de la geometría del recinto y de sus materiales es la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y ecos flotantes (flutter echoes).

#### 3.1.2.1. Ecos

El eco se produce cuando llega al receptor una reflexión de nivel elevado y con un retardo superior a 50 ms con respecto al sonido original, lo que hace que se perciba como un suceso aislado, generando una sensación molesta y produciendo una pérdida de la inteligibilidad.

A continuación, se muestra en la Figura 3.3 la relación entre el sonido retardado y la inteligibilidad de la palabra.

Si la reflexión llega antes de 50 ms (Zona A), el oído integra el sonido reflejado y se produce un aumento de la inteligibilidad.

En caso de que la reflexión llegue antes de 50 ms pero con un nivel elevado (Zona B), el oído también integra el sonido reflejado, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora hacia la superficie que ha generado la reflexión.

Si el sonido reflejado llega después de 50 ms pero con un nivel bajo (Zona C) no afecta a la inteligibilidad de la palabra, debido al enmascaramiento.

El caso más desfavorable se produce cuando la reflexión llega después de 50 ms y con un nivel elevado (Zona D), ya que el sonido reflejado se percibe como un eco y afecta negativamente a la inteligibilidad de la palabra.

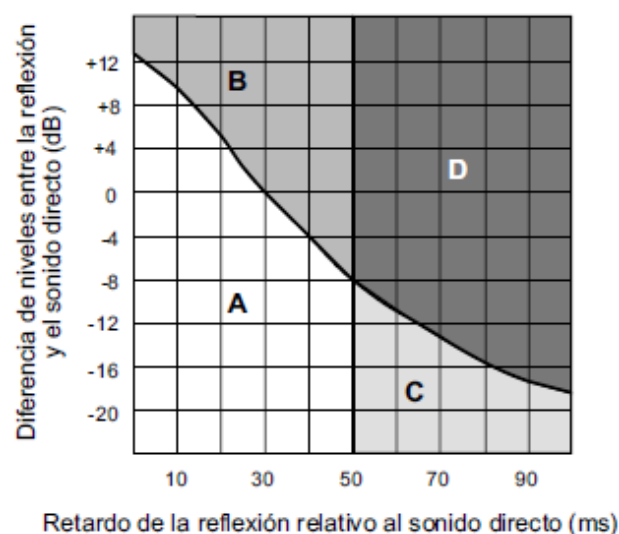
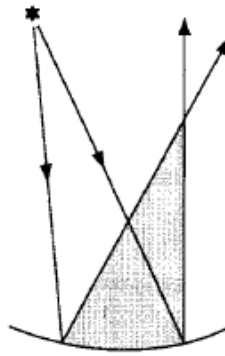


Figura 3.3. Relación entre el retardo del sonido y la inteligibilidad de la palabra.

Para la eliminación de los ecos, la solución puede ser colocar materiales absorbentes en las zonas que los producen o reorientarlas hacia zonas menos problemáticas.

### 3.1.2.2. Focalizaciones del sonido

La existencia de superficies cóncavas, como en el caso de recintos deportivos con cúpula, genera un efecto de focalización del sonido. Este efecto hace que el sonido reflejado se concentre en una zona reducida y con un nivel mucho más alto. Puede suceder que la energía del sonido reflejado focalizado sea incluso superior al sonido directo.

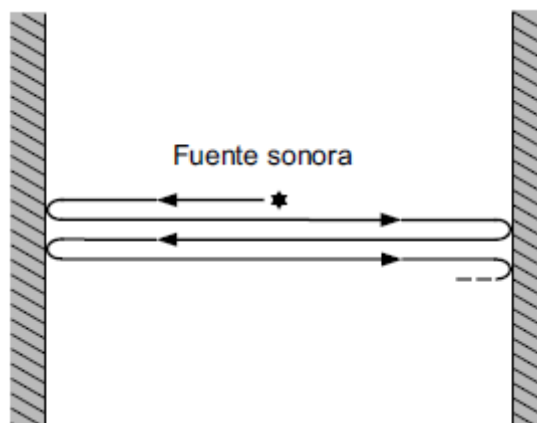


*Figura 3.4. Concentración del sonido producido por una superficie cóncava.*

La aparición de focalizaciones de sonido puede ser paliada también mediante la colocación de materiales absorbentes. En el caso de que sea un recinto deportivo con techo en forma de cúpula, sería conveniente cubrirlo con material absorbente. Evidentemente, si se puede tratar la aparición de focalizaciones de sonido desde el proceso de diseño del recinto, habría que intentar evitar la colocación de superficies cóncavas tanto en las paredes como en el techo.

### 3.1.2.3. Ecos flotantes

Las características de este tipo de recintos favorecen también la aparición de un tipo de eco llamado eco flotante (flutter echo), o eco de aleteo. El eco flotante es una reflexión múltiple producida por una fuente sonora situada entre dos paredes paralelas reflectantes.



*Figura 3.5. Eco flotante generado al situar una fuente sonora entre dos paredes paralelas reflectantes.*

El problema del eco flotante se puede solucionar dando una inclinación de 5° o 10° a las paredes que dan lugar a este fenómeno, pero esta solución resulta impracticable en un recinto ya

construido. La posible solución a adoptar en un recinto que ya se encuentra construido es cubrir estas paredes con materiales absorbentes o difusores sonoros.

### **3.1.3. Efecto tambor**

El efecto tambor se produce cuando un objeto golpea el suelo (pisadas, una pelota botando...) y se debe al efecto resonador del pavimento producido por la existencia de cavidades de aire entre dicho pavimento y la estructura de soporte.

Este efecto se puede reducir mediante la colocación de material absorbente en la cavidad existente entre el pavimento y la estructura de soporte. También se puede montar el pavimento directamente sobre la estructura de soporte para que de esta manera no exista la cavidad.

### **3.1.4. Ruido de fondo**

En un recinto deportivo hay que diferenciar dos tipos de ruido de fondo. Por una parte, está el ruido de fondo existente cuando no se está llevando a cabo ninguna actividad, y suele estar originado por las instalaciones eléctricas, el sistema de climatización y el ruido proveniente del exterior del recinto. El otro tipo de ruido de fondo que existe en este tipo de recintos es el que se genera cuando se está llevando a cabo una actividad deportiva.

El ruido de fondo existente en plena actividad deportiva puede llegar a ser un problema a la hora de sonorizar un recinto deportivo, por los elevados valores de nivel de presión sonora que se pueden alcanzar. En la *Noise Navigator Sound Level Database*, una base de datos que contiene más de 1700 valores de niveles sonoros de diferentes tipos de actividades, podemos encontrar algunos ejemplos de valores de ruido de fondo en dB(A) para diferentes tipos de eventos deportivos:

<b>Evento deportivo</b>	<b>Nivel de ruido en dB(A)</b>
Baloncesto	99-118
Fútbol americano	81-91
Fútbol	100
Béisbol	85-107
Hockey	99-103

*Tabla 3.2. Niveles de ruido existentes en diferentes tipos de eventos deportivos, extraídos de la base de datos Noise Navigator Sound Level Data Base.*

Aunque los ejemplos de actividades expuestos en este ejemplo son eventos multitudinarios celebrados en grandes estadios, estos valores dan una idea del problema que puede suponer realizar una sonorización que cubra este tipo de eventos, ya que el nivel de presión sonora proporcionado por el refuerzo sonoro tiene que superar el nivel de ruido de fondo existente en una cierta cantidad.

En la publicación *Acoustics in Practice* (1, 1) se muestra una gráfica (Figura 3.6) con diferentes niveles de ruido en varias actividades deportivas. Los valores están dados en dB(A) en las bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz. Se puede observar que los niveles más altos de ruido se encuentran entre 500 Hz y 2 kHz.

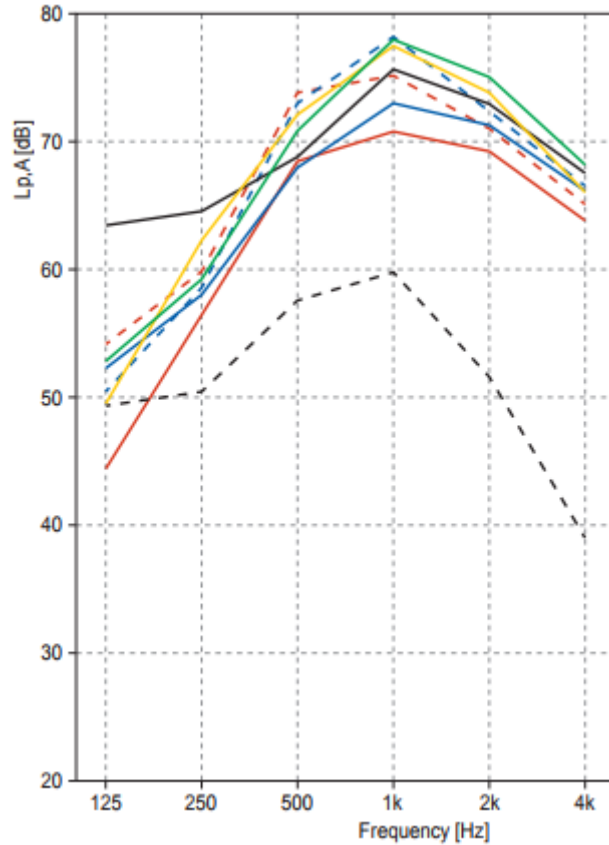


Figura 3.6. Valores de ruido en dB(A) en diferentes tipos de actividades deportivas.

En cuanto al ruido de fondo percibido cuando no se está llevando a cabo ninguna actividad, se suele recomendar un valor inferior a 40 dB.

Por ejemplo, en el *Building Bulletin 93: Acoustic Design of Schools* (2003) se establece como valor máximo de ruido de fondo en instalaciones deportivas y gimnasios en espacios escolares:

$$L_{Aeq,30\ min} \leq 40\ dB$$

El grado de molestia del ruido de fondo se puede evaluar comparando los niveles de ruido existentes en un recinto en cada banda de octava desde 63 Hz y 8 kHz con unas curvas de referencia llamadas curvas NC (Noise Criteria) (Figura 3.7).

Estas curvas se utilizan para establecer los niveles máximos de ruido recomendados para diferentes tipos de recintos.

El SPL en dB para cada banda de octava correspondiente a esas curvas es:

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
NC 40	64	56	50	45	41	39	38	37
NC 50	71	64	58	54	51	49	48	47

Tabla 3.3. Valores de SPL correspondientes a las curvas NC 40 y NC 50.



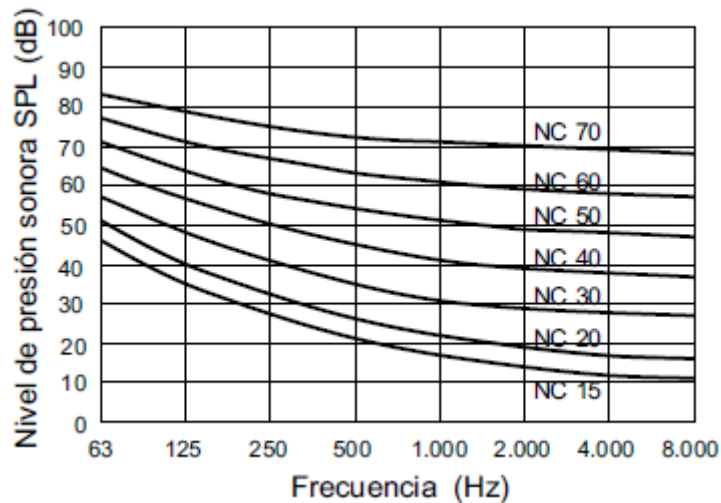


Figura 3.7. Curvas NC (Noise Criteria).

### **3.2. Requisitos para la sonorización de un recinto cerrado de uso deportivo**

Los objetivos que se han de cumplir a la hora de sonorizar un recinto de este tipo son:

- Inteligibilidad de la palabra.
- Cobertura uniforme para todo el recinto.
- Buena relación señal/ruido.
- Fidelidad de la señal reproducida.

#### **3.2.1. Inteligibilidad**

Es preciso que los mensajes hablados emitidos sean claramente inteligibles para toda la audiencia. Los mensajes procedentes del refuerzo sonoro pueden ser información sobre el evento que se esté celebrando o avisos procedentes de recepción, como por ejemplo avisos de emergencia. Si bien es cierto que el grado de inteligibilidad no necesita ser igual de bueno que en una sala de conferencias, es necesario un nivel aceptable de inteligibilidad de la palabra.

Además de la inteligibilidad de la palabra, aunque en menor medida, en ciertos eventos deportivos como la gimnasia rítmica, en el que la música tiene gran importancia, es también conveniente un grado aceptable de inteligibilidad de la música<sup>2</sup>.

El grado de inteligibilidad de la palabra se puede cuantificar mediante dos parámetros: %ALCons y STI/RASTI, explicados con anterioridad en el apartado dedicado a la teoría psicoacústica (Apartado 2.4.2).

Para un recinto de uso deportivo, los valores recomendados de estos parámetros son:

- %ALCons  $\leq$  11.4%
- STI/RASTI  $\geq$  0.5

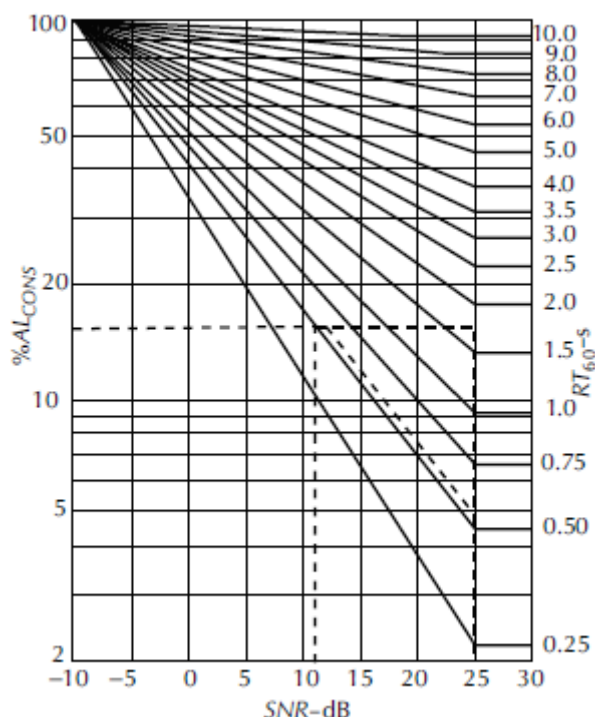
<sup>2</sup> A día de hoy no se ha definido ningún parámetro para valorar la inteligibilidad de la señal musical.

Por ejemplo, para una sala de conferencias, en la que es necesario un mayor grado de inteligibilidad de la palabra, los valores recomendados son:

- %ALCons  $\leq 5\%$
- STI/RASTI  $\geq 0.65$

### 3.2.2. Relación señal/ruido

Para garantizar una correcta inteligibilidad es necesario que el nivel de presión sonora proporcionado por el sistema de refuerzo sea superior al ruido de fondo existente en el recinto.



*Figura 3.8. Influencia de la relación señal/ruido en el %ALCons.*

En la Figura 3.8 se puede observar la influencia de la relación señal/ruido en el %ALCons. El %ALCons mejora cuanto mayor es la relación señal/ruido hasta que ésta alcanza el valor de 25 dB. A partir de este punto, la inteligibilidad no mejora aunque mejore la relación señal/ruido.

La gráfica también indica que en un recinto con un tiempo de reverberación de 1.5 s, es necesaria una relación señal/ruido de 25 dB para garantizar una correcta inteligibilidad, mientras que en un recinto con un tiempo de reverberación de 0.5 s es suficiente una relación señal/ruido de 11 dB para tener un valor de %ALCons que garantice una correcta inteligibilidad.

En lo que a avisos de emergencia respecta, la norma UNE 23007-14 (Sistemas de detección y alarma de incendios) establece para las alarmas de voz en caso de incendio un nivel como mínimo 10 dB(A) por encima de otros ruidos que sea probable que persistan durante 10 s o más.

### **3.2.3. Cobertura uniforme**

El refuerzo sonoro utilizado ha de ser capaz de ofrecer una cobertura uniforme, es decir, una homogeneidad en los niveles de presión para todas las zonas de público y, en el caso de un recinto deportivo, para la pista donde tienen lugar los eventos deportivos.

El objetivo es lograr una diferencia menor a  $\pm 3$  dB en las bandas de 500 Hz a 2 kHz para todos los puntos de la zona de público y de la pista.

### **3.2.4. Fidelidad de la señal**

El equipo de sonido utilizado ha de ser capaz de proporcionar una buena respuesta en frecuencia para el rango de frecuencias deseado y la menor distorsión posible.

#### **3.2.4.1. Ancho de banda**

El tipo de mensaje a transmitir en eventos deportivos puede ser de dos tipos: hablado (presentación del evento, animación, avisos de emergencia...) y musical (campeonatos de gimnasia rítmica, hilo musical...), por lo que el sistema tendrá que ser capaz de tener una respuesta en frecuencia plana en los rangos de frecuencias de cada tipo de mensaje.

En cuanto al mensaje hablado, la máxima contribución al nivel de la voz se sitúa en las frecuencias medias, mientras que la mayor contribución a la inteligibilidad se encuentra entre 2 kHz y 4 kHz. Por lo tanto, el ancho de banda correspondiente al mensaje hablado se puede situar entre 500 Hz y 4 kHz.

En lo que respecta a la música, su rango frecuencial ocupa prácticamente todo el espectro audible (20 Hz – 20 kHz), aunque en este tipo de eventos la calidad musical no tiene tanta importancia como en un concierto, por lo que se puede establecer un rango más pequeño que garantice la calidad musical.

Teniendo en cuenta que el rango de frecuencias de la señal hablada se encuentra dentro del rango de frecuencias de la música, el sistema debería ser capaz de proporcionar una respuesta en frecuencia plana en el ancho de banda comprendido entre aproximadamente 150 Hz y 16 kHz.

#### **3.2.4.2. Distorsión armónica total**

La distorsión armónica se produce cuando al aplicar a un altavoz un tono de frecuencia  $f_0$ , este genera a la salida tonos de frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental  $f_0$ , es decir, genera armónicos.

La distorsión armónica total (THD) se puede calcular como:

$$THD(\%) = \frac{\text{Potencia de los armónicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental } f_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Los valores de THD deberán ser inferiores al 4% para las bandas de octava centradas en 125 Hz y 250 Hz, e inferiores al 2% para el resto de bandas de octava.

## **3.3. Tipos de refuerzos sonoros**

El tipo de refuerzo sonoro utilizado puede ser de varios tipos:

- Sistema centralizado
- Sistema distribuido
- Sistema mixto

### **3.3.1. Sistema centralizado**

En un sistema de refuerzo centralizado los altavoces se encuentran concentrados en un solo punto y proporcionan cobertura para todo el área de audiencia desde ese único punto. Este tipo de refuerzos suelen estar colocados en el centro del recinto, sobre la pista principal.

Por lo general, este tipo de refuerzo se utiliza en grandes recintos, como por ejemplo pabellones de baloncesto, que cuentan con gradas alrededor de toda la pista central y muy cercanas a ésta.

La configuración utilizada suele ser un sistema de line arrays que proporcionan cobertura a toda la zona del graderío y un refuerzo compuesto por cajas más pequeñas para cubrir la pista de juego.

#### **3.3.1.1. Ejemplos de sistemas centralizados**

- ATT Center Arena, en San Antonio (Estados Unidos)

El ATT Center Arena es el estadio del equipo de la NBA San Antonio Spurs. El estadio es capaz de albergar hasta 18500 espectadores en los partidos de baloncesto, mientras que esta cifra se reduce a 13000 espectadores en los partidos de hockey sobre hielo, ya que el estadio es también utilizado por el equipo San Antonio Rampage, de la American Hockey League (AHL). Además, este estadio alberga ocasionalmente otro tipo de espectáculos, como combates de artes marciales y espectáculos de lucha libre.

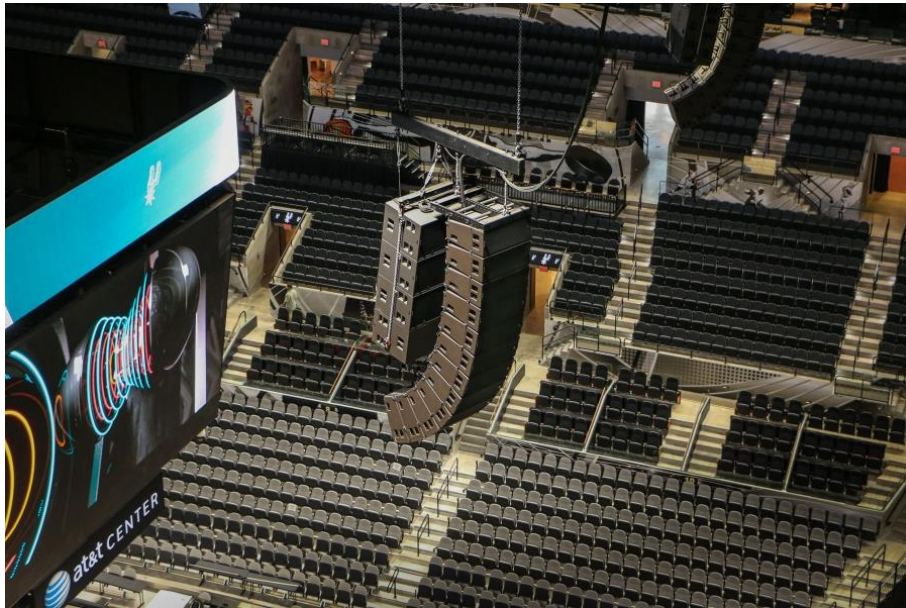
El diseño del refuerzo sonoro fue realizado por Wrightson, Johnson, Haddon & Williams (WJHW) y la instalación fue llevada a cabo por LD Systems.



*Figura 3.9. Sistema centralizado del ATT Center Arena de San Antonio.*

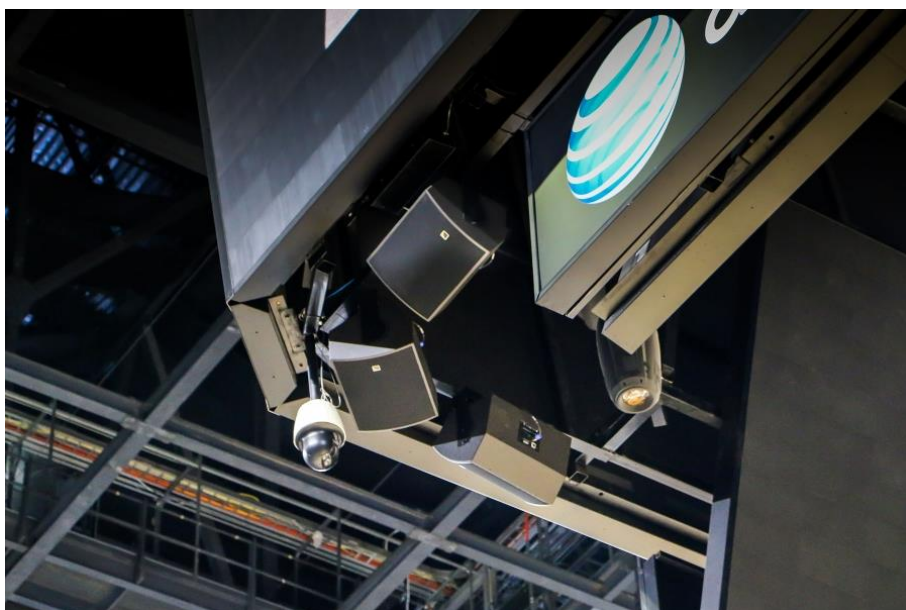
El sistema elegido para la sonorización del recinto fue un sistema centralizado ubicado alrededor del videomarcador que está situado en el centro del estadio, encima de la pista de juego.

El sistema está compuesto por 72 cajas del modelo L-Acoustics Kudo, divididas en 6 line arrays de 12 cajas cada uno, colocados alrededor del videomarcador y orientados hacia las gradas, de manera que se proporciona cobertura para todo el público. Para el refuerzo de las bajas frecuencias se posicionaron 24 subwoofers del modelo L-Acoustics SB28 divididos en 6 arrays de 4 cajas cada uno, situados también alrededor del videomarcador.



*Figura 3.10. Imagen de uno de los line arrays y uno de los arreglos de subgraves situados alrededor del videomarcador.*

Para proporcionar cobertura a la pista de juego se situaron debajo del videomarcador 12 altavoces del modelo L-Acoustics 12XTi.



*Figura 3.11. Refuerzo sonoro para la pista de juego.*



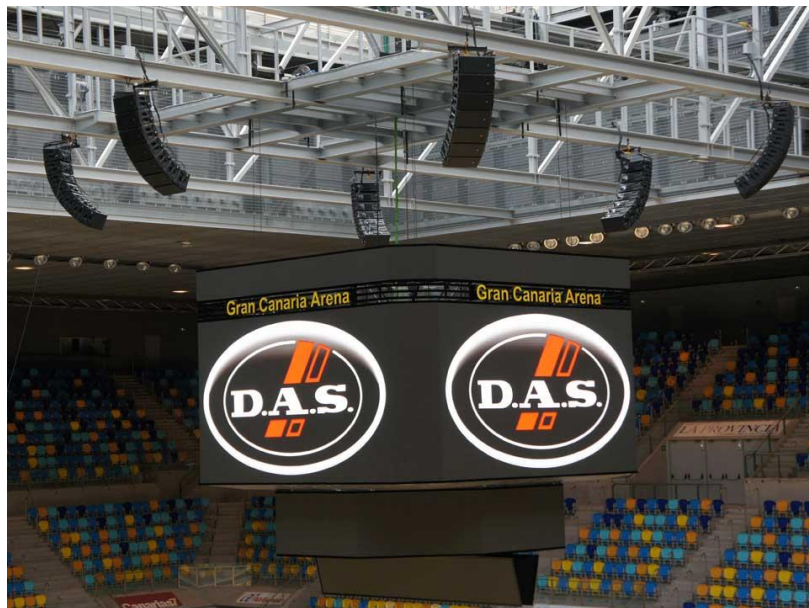
- Gran Canaria Arena, en Las Palmas de Gran Canaria

El Gran Canaria Arena es la sede habitual del Club Baloncesto Gran Canaria. La capacidad del recinto es de aproximadamente 11500 espectadores para su configuración con cancha para baloncesto, pero se puede ampliar hasta casi 18000 espectadores para actuaciones musicales u otro tipo de espectáculos.

La compañía que llevó a cabo la instalación fue Canarias Hipermusic, y el equipo de sonido utilizado fue de la empresa de sonido profesional D.A.S.

La solución adoptada fue un refuerzo de tipo centralizado compuesto por 6 line arrays de 7 cajas autoamplificadas D.A.S. Aero 12 cada uno, para dar cobertura a la zona de las gradas, y 4 sistemas de tiro largo D.A.S. BiDriver Plus para reforzar la inteligibilidad de la palabra sobre la pista e incidir directamente sobre la misma.

El recinto cuenta con gradas retráctiles de uso alternativo en función de las necesidades del tipo de evento, por lo que los line arrays se configuraron de tal manera que las 5 unidades superiores de cada line array proporcionan el tiro largo para las gradas fijas, y las 2 cajas situadas en la parte inferior del array proporcionan el tiro corto para las gradas retráctiles. De esta manera, cuando no se utilizan las gradas retráctiles se pueden silenciar (“mutear”) las cajas situadas en la parte inferior del line array.



*Figura 3.12. Sistema de refuerzo centralizado del Gran Canaria Arena, en Las Palmas de Gran Canaria.*



*Figura 3.13. Altavoz D.A.S. BiDriver Plus, como los utilizados para dar cobertura a la pista del Gran Canaria Arena.*

### **3.3.2. Sistema distribuido**

Este tipo de refuerzo sonoro consiste en distribuir los altavoces en diferentes puntos del espacio, de manera que cada altavoz o grupo de altavoces cubra una determinada zona del recinto.

Generalmente, los altavoces están situados en puntos cercanos a las zonas de público, con lo que la inteligibilidad que se logra con este tipo de refuerzo es mayor que con un sistema centralizado, debido a la mayor proximidad de los altavoces, sobre todo para la parte del público que se encuentre en el campo directo de la fuente.

Los sistemas distribuidos presentan el inconveniente de la pérdida de la localización de la procedencia del sonido, pero es un factor que no tiene mayor importancia dada la naturaleza de los eventos que normalmente tienen lugar en los recintos deportivos.

La necesidad de un mayor número de altavoces y de una distribución de éstos a lo largo del recinto supone una desventaja con respecto a un sistema centralizado, ya que complica el conexionado y el cableado de los equipos (tiradas muy largas de cable pueden originar pérdidas en la señal).

#### **3.3.2.1. Ejemplos de sistemas distribuidos:**

##### **- Complejo Deportivo Felipe VI, en Lorca (Murcia)**

La instalación del sistema de sonido del Complejo Deportivo Felipe VI fue llevada a cabo por la empresa Sotroni en colaboración con la empresa D.A.S.

El sistema de refuerzo elegido fue un sistema distribuido compuesto por 15 cajas autoamplificadas D.A.S. Avant 15A, distribuidos en 5 clusters de 3 cajas cada uno a lo largo del recinto, para proporcionar cobertura tanto a las gradas como a la pista central. En cada cluster, dos cajas están orientadas hacia las gradas y otra hacia la pista.



*Figura 3.14. Sistema distribuido del Complejo Deportivo Felipe VI de Lorca.*



*Figura 3.15. Orientación de las cajas para proporcionar cobertura tanto a las gradas como a la pista.*

- Polideportivo Horst Korber, en Berlín

El proyecto de sonorización del recinto, que cuenta con una capacidad de hasta 3500 espectadores, fue llevado a cabo por la empresa alemana Neuenhagen.

La solución adoptada fue un sistema formado por tres clusters, para poder controlar individualmente el sonido para cada una de las tres secciones en las que se puede dividir la pista. El sistema tiene la posibilidad de que cada agrupación de altavoces funcione en conjunto o individualmente, dependiendo de la configuración del recinto en cada momento.

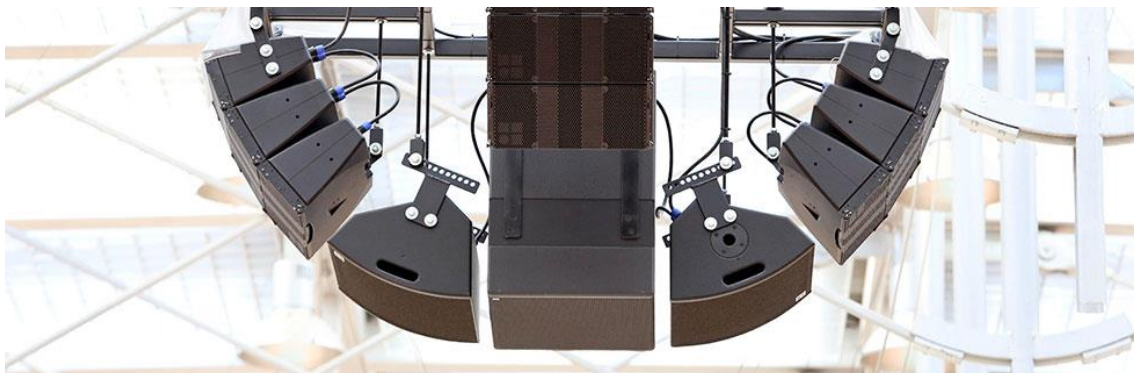


*Figura 3.16. Configuración del refuerzo sonoro del polideportivo Horst Korber de Berlín.*

En la Figura 3.16 se observa la configuración adoptada para la sonorización de este recinto. En la imagen se pueden ver dos de los tres clusters, correspondientes a dos de las tres zonas en las



que se puede dividir la pista central, así como la cortina separadora de las dos zonas (en este caso se encuentra recogida).



*Figura 3.17. Imagen de uno de los tres clusters instalados en el polideportivo Horst Korber de Berlín.*

El equipo de sonido utilizado es de la empresa d&b audiotechnik. Cada cluster está formado por dos line arrays formados por tres cajas T10 cada uno, dos monitores MAX12 y un subwoofer. La función de los line arrays es dar cobertura a las zonas de público en las tribunas plegables, mientras que los monitores MAX12, inclinados hacia abajo, se encargan de cubrir la pista central. Los subwoofers se encargan de reforzar las frecuencias bajas.

Los clusters situados en cada uno de los extremos del recinto disponen además de otro line array de tres cajas para cubrir las tribunas plegables de los extremos.

### **3.3.3. Sistema mixto**

Hay ocasiones en las que no es posible proporcionar una cobertura total con un sistema centralizado, por lo que es necesario combinar ambos tipos de refuerzo sonoro. Por ejemplo, en grandes recintos sonorizados con un refuerzo sonoro situado sobre la pista central, se añaden sistemas distribuidos para la zona VIP y para la zona de prensa.

## 4. Line arrays

### 4.1. Introducción a los line arrays

El término anglosajón line array se podría traducir como “agrupación en línea”. En el ámbito de la electroacústica, el término line array se refiere a una agrupación vertical de fuentes que actúa como una única fuente lineal.

Hoy en día es el sistema más utilizado para la sonorización no sólo de eventos musicales (este tipo de agrupaciones de altavoces se pueden encontrar tanto en pequeñas salas de conciertos como en grandes festivales al aire libre) sino también de auditorios (para diferentes tipos de espectáculos como teatro, danza, conferencias...), recintos deportivos, etc.

El pionero del estudio de agrupaciones de fuentes sonoras fue Harry Olson, un doctor en física nacido en Iowa en 1901. Olson estudió el comportamiento entre dos fuentes sonoras en función de la frecuencia reproducida y la distancia de separación entre ellas, llegando a la conclusión de que cuanto más separadas estén las dos fuentes, el haz de radiación es más estrecho y aparecen cancelaciones en los laterales, surgiendo lóbulos secundarios.

Harry Olson también estudió cómo se comporta una agrupación lineal de fuentes sonoras. La principal conclusión que obtuvo con sus experimentos fue que cuanto mayor es la agrupación de fuentes (mayor longitud) más estrecho es el haz de radiación.

Estas dos conclusiones a las que llegó el físico estadounidense son dos conceptos claves en los que se basa la tecnología utilizada en los line arrays, de ahí su importancia.

Antes de entrar en detalle con los conceptos teóricos que están detrás del funcionamiento del line array es necesario entender cómo se produce la suma acústica entre dos o más fuentes sonoras que emiten la misma señal.

### 4.2. Suma acústica

Cuando se dispone de dos o más altavoces del mismo tipo emitiendo la misma señal, normalmente procedente de la mesa de mezclas, existe un alto grado de coherencia entre las señales emitidas por cada uno de los altavoces. Esto se debe a que, aunque la señal es convolucionada con la respuesta de cada uno de los altavoces, al ser estos del mismo tipo, la respuesta va a ser muy similar, y la señal emitida va a ser también muy similar. Por lo tanto, para este tipo de casos, la suma de las señales de los altavoces se puede representar matemáticamente como una suma coherente de las señales acústicas.

#### 4.2.1. Suma de señales coherentes

Si se dispone de dos señales coherentes,  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$ , la presión eficaz total vendrá determinada por:

$$p_{efT} = \sqrt{p_{ef1}^2 + p_{ef2}^2 + 2p_{ef1}p_{ef2}\cos(\Delta\varphi)} \quad (4.1)$$

donde  $p_{ef1}$  y  $p_{ef2}$  son las presiones sonoras eficaces de las señales  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  respectivamente, y  $\Delta\varphi$  es la diferencia de fase entre ambas señales.

Al tratarse de una suma coherente, la suma resultante va a depender de la fase relativa entre las señales, dando lugar a puntos donde la suma sea máxima e incluso puntos en los que se produzca cancelación total. La diferencia de fase está determinada por la distancia entre cada fuente y el punto de observación, por lo que resulta clave la separación física existente entre las fuentes que emiten las señales.

Si las dos señales  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  se encuentran en fase ( $\Delta\varphi = 0$ ) la presión total resultante será:

$$p_{efT} = \sqrt{p_{ef1}^2 + p_{ef2}^2 + 2p_{ef1}p_{ef2}\cos(\Delta\varphi)} = p_{ef1} + p_{ef2} \quad (4.2)$$

Al tratarse de dos señales iguales emitidas por dos fuentes iguales, la presión total se puede aproximar por:

$$p_{efT} = p_{ef1} + p_{ef2} = 2p_{ef1} \quad (4.3)$$

Si se calcula el nivel de presión total en este caso:

$$L_p = 10\log \frac{p_{efT}^2}{p_{ref}^2} = 10\log \frac{(p_{ef1} + p_{ef2})^2}{p_{ref}^2}$$

$$L_p = 10\log \frac{p_{ef1}^2}{p_{ref}^2} + 6 \quad (4.4)$$

Es decir, el nivel de presión sonora resultante será el nivel de presión de una de las señales más 6 dB. Esta cantidad es la suma máxima que se puede conseguir con dos fuentes emitiendo la misma señal.

Si se dispone de más de dos señales, todas ellas iguales y sin diferencia de fase entre ellas, también se obtiene la suma máxima, y el nivel de presión sonora total se puede calcular como:

$$L_p = L + 20\log(n) \quad (4.5)$$

donde  $L$  es el nivel de presión sonora de cualquiera de las señales y  $n$  el número de señales.

En el caso en que las señales  $p_1(t)$  y  $p_2(t)$  se encuentren en contrafase ( $\Delta\varphi = \pi$ ):

$$p_{efT} = p_{ef1} - p_{ef2} \quad (4.6)$$

Como  $p_{ef1} = p_{ef2}$ :

$$p_{efT} = 0$$

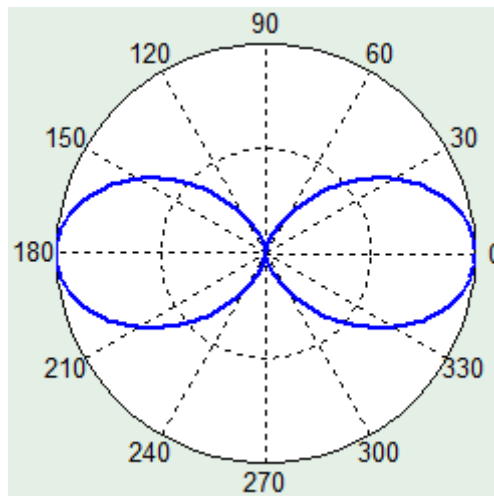
Esto implica que se produzca una cancelación total, siendo el nivel de presión sonora total:

$$L_p = 10\log 0 = -\infty$$

Como se puede observar con los dos casos anteriores, el hecho de sumar dos señales no se traduce siempre en un aumento de nivel en la señal resultante. Por ejemplo, una diferencia de fase de  $\frac{2\pi}{3}$  implica un aumento de nivel de 0 dB, es decir, como si emitiese una sola fuente, y una diferencia de fase entre  $\frac{2\pi}{3}$  y  $\pi$  produce una resta que da como resultado una disminución de nivel con respecto al que se obtendría con una sola fuente.

#### 4.2.2. Fuente puntual doble

Mediante el ejemplo de una fuente puntual doble se puede entender el cómo interactúan varias fuentes iguales agrupadas emitiendo señales coherentes. Consideremos dos fuentes omnidireccionales exactamente iguales separadas físicamente 2 metros y que emiten ondas coherentes de diferentes frecuencias. Además, en este caso, ambas fuentes emiten en fase. En el primer caso emite a una frecuencia de 85 Hz.



*Figura 4.1. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 85 Hz.*

Como se puede observar en la Figura 4.1, el nivel máximo de presión se produce en el eje de la fuente puntual doble, ya que las dos señales llegan igualadas en fase y en amplitud, lo que produce una suma de 6 dB con respecto al nivel que tendría una fuente puntual simple.

En los laterales de la fuente puntual doble la presión es nula. Esto se debe a que la separación entre fuentes es de 2 metros, que equivale a la mitad de la longitud de onda de 85 Hz ( $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{85} = 4 \text{ m}$ ). Esto implica una diferencia de fase entre ambas señales de  $\pi$  radianes, por lo que, como se ha visto anteriormente:

$$p_{efT} = 0$$

Es decir, un nivel de presión sonora de  $-\infty$  dB (cancelación total) para los ángulos de 90° y 270°.

Se puede ver cómo, a partir de dos fuentes omnidireccionales se ha configurado un arreglo bidireccional para una determinada frecuencia a partir de la separación física entre las fuentes.

Si la fuente puntual doble emite a una frecuencia de 42.5 Hz, la separación de 2 metros equivale a  $\frac{\lambda}{4}$  de dicha frecuencia. En este caso, en los laterales de la fuente puntual doble la diferencia de

fase equivale a  $\frac{\pi}{2}$  radianes. Esto implica que la presión efectiva total en este punto ya no va a ser 0. Si se aplica la fórmula vista anteriormente (4.1):

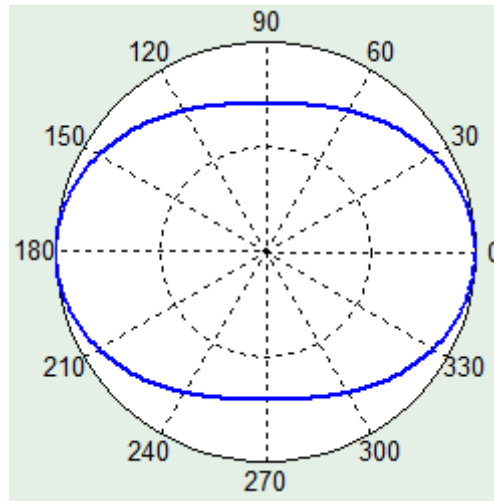
$$p_{efT} = \sqrt{p_{ef1}^2 + p_{ef2}^2 + 2p_{ef1}p_{ef2} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \sqrt{p_{ef1}^2 + p_{ef2}^2}$$

Como ambas fuentes están emitiendo la misma señal:

$$p_{efT} = \sqrt{2p_{ef1}^2}$$

Esto hace que el nivel de presión sonora sea:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{ef1}^2}{p_{ref}^2} + 3$$



*Figura 4.2. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 42.5 Hz.*

En el eje del arreglo se sigue produciendo una suma de 6 dB en el nivel de presión, ya que las señales llegan igualadas en fase y amplitud.

Ahora la fuente emite a una frecuencia de 170 Hz. La separación de 2 metros entre las dos fuentes omnidireccionales equivale a  $\lambda$  para esta frecuencia, por lo que la diferencia de fase en los laterales del arreglo es de  $2\pi$ . La consecuencia de esta diferencia de fase de un periodo entero es que el nivel de presión sonora en los laterales va a ser la misma que en el eje, pues en todos estos puntos las señales llegan igualadas en fase y amplitud.

En cambio, se puede observar que a 30°, 150°, 210° y 330° del eje del arreglo se producen cancelaciones totales. Esto hace que en el diagrama polar se produzcan cuatro lóbulos diferenciados.

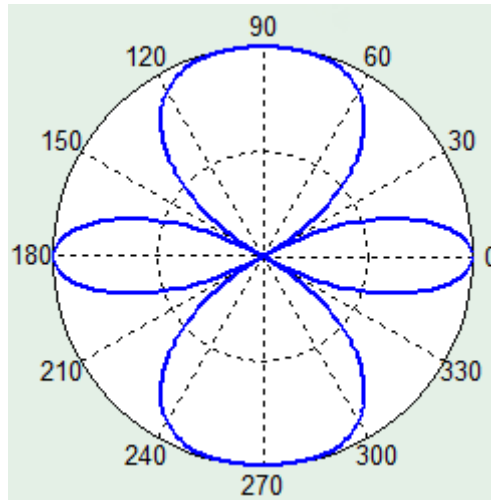


Figura 4.3. Representación del nivel de presión sonora producido por una fuente puntual doble con una separación de 2 metros a una frecuencia de 170 Hz.

#### 4.2.3. Patrón de directividad

Se puede hallar la amplitud sonora que va a haber en cada punto según el receptor se desplaza del eje, y de esta manera saber cómo es el patrón de directividad para cada frecuencia, mediante la expresión:

$$p(r, \alpha) = 2p_o(r) \left| \cos\left(\frac{kB \sin(\alpha)}{2}\right) \right| \quad (4.7)$$

donde:

$p_o$  es la amplitud de la presión sonora

$r$  es la distancia a la que se encuentra el receptor

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , es el número de onda

$B$  es la separación física entre las fuentes

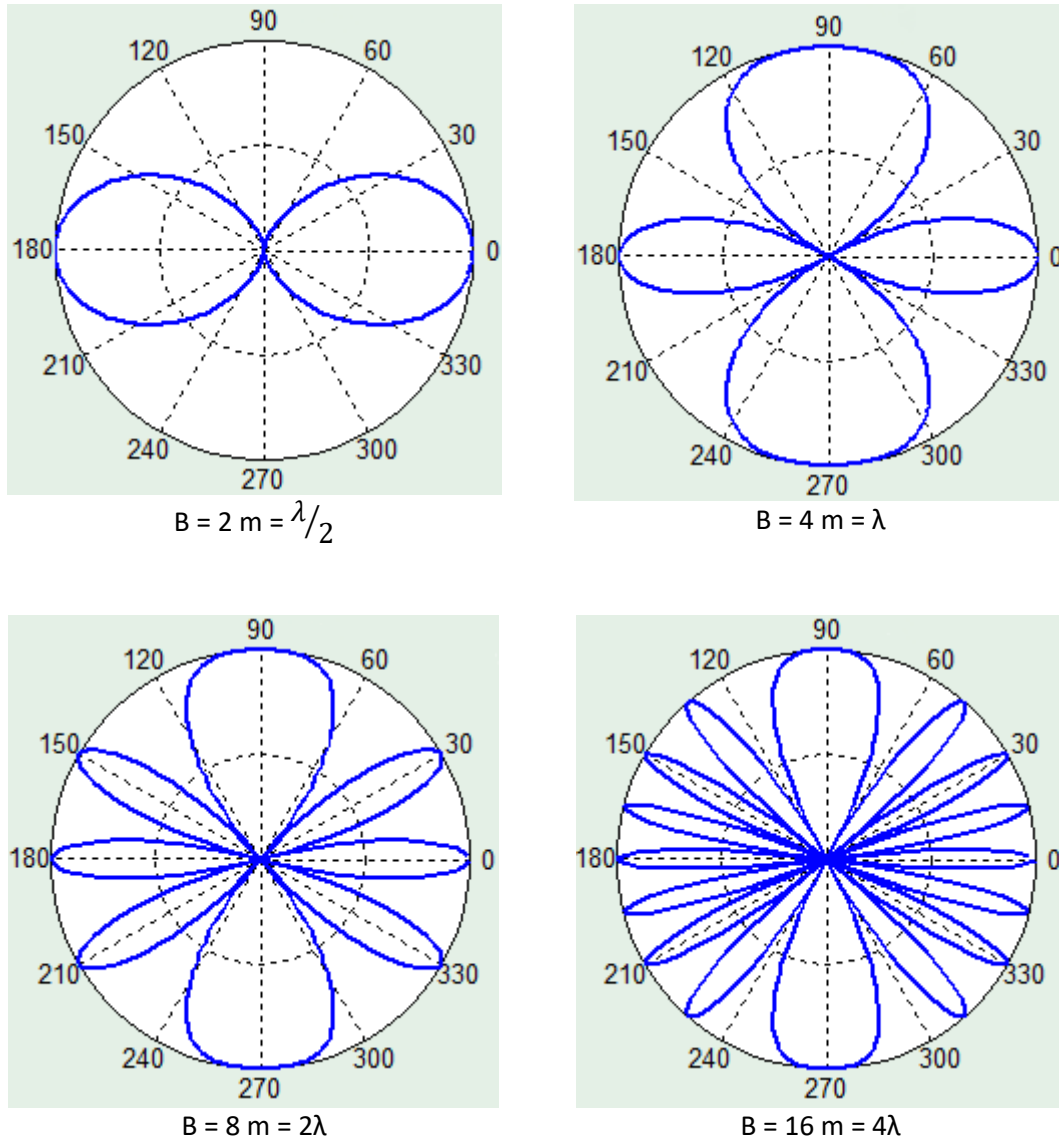
$\alpha$  es el ángulo respecto al eje de la fuente puntual doble

Por ejemplo, en el caso en el que la fuente puntual doble emite a una frecuencia de 170 Hz, siendo la separación entre las fuentes simples de 2 metros, la presión resultante cuando el receptor se encuentra desplazado  $30^\circ$  ( $\frac{\pi}{6}$  radianes) es 0. Esto mismo sucede cuando el receptor se desplaza  $150^\circ$ ,  $210^\circ$  y  $330^\circ$  del eje. Como se puede observar, de esta manera se obtiene el patrón de directividad de la Figura 4.3.

Es importante resaltar que según aumenta el factor  $kB$  aparecen más lóbulos en el diagrama polar. Es decir, para una misma distancia de separación entre las fuentes simples, según aumenta la frecuencia aumenta el número de lóbulos. De la misma manera, para una misma frecuencia, el número de lóbulos aumenta cuando aumenta la separación entre fuentes.

Esto se puede ilustrar mediante el ejemplo anterior de la fuente puntual doble, con una separación entre fuentes de 2 metros y emitiendo a una frecuencia de 85 Hz, viendo como varía el patrón de directividad según se aumenta la separación entre las fuentes (Figura 4.4).

También se puede ver en la Figura 4 que tan sólo se produce cancelación en los laterales para la distancia entre fuentes que coincide con media longitud de onda de la frecuencia reproducida. Para el resto de distancias de separación que se representan, éstas son múltiplo de la longitud de onda, por lo que en los laterales del arreglo la suma va a producir un nivel 6 dB por encima del nivel que generaría una sola fuente.



*Figura 4.4. Variación del patrón de directividad en relación al aumento de la separación entre fuentes.*

### 4.3. Line array

Un line array es una agrupación vertical de fuentes que actúa como una sola fuente lineal. Una agrupación de este tipo debe cumplir dos características muy importantes: suma coherente entre las fuentes individuales que componen el line array y control de la directividad vertical.

#### 4.3.1. Fuente lineal

Una fuente lineal teórica es un cilindro de longitud infinita que contrae y expande su radio, dando lugar a la emisión de ondas cilíndricas, que decaen 3 dB cada vez que se dobla la distancia.

Lo que se consigue con un line array es crear una fuente lineal de longitud finita. En el campo cercano de la fuente, las ondas generadas son cilíndricas y sufren una atenuación de 3 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. En cambio, en el campo lejano el nivel decae 6 dB al doblar la distancia, ya que a partir de este punto las ondas son esféricas. La distancia a la cual comienza el campo lejano depende de la frecuencia y viene determinada por la siguiente expresión:

$$r \geq \frac{L^2}{2\lambda} \quad (4.8)$$

donde  $r$  indica la distancia,  $L$  es la longitud de la fuente lineal y  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia emitida por la fuente.

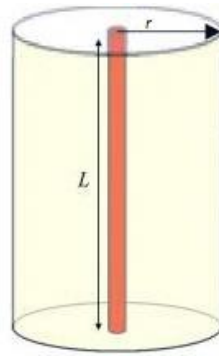


Figura 4.5. Fuente lineal.

La directividad en campo lejano de este tipo de fuentes responde a la función:

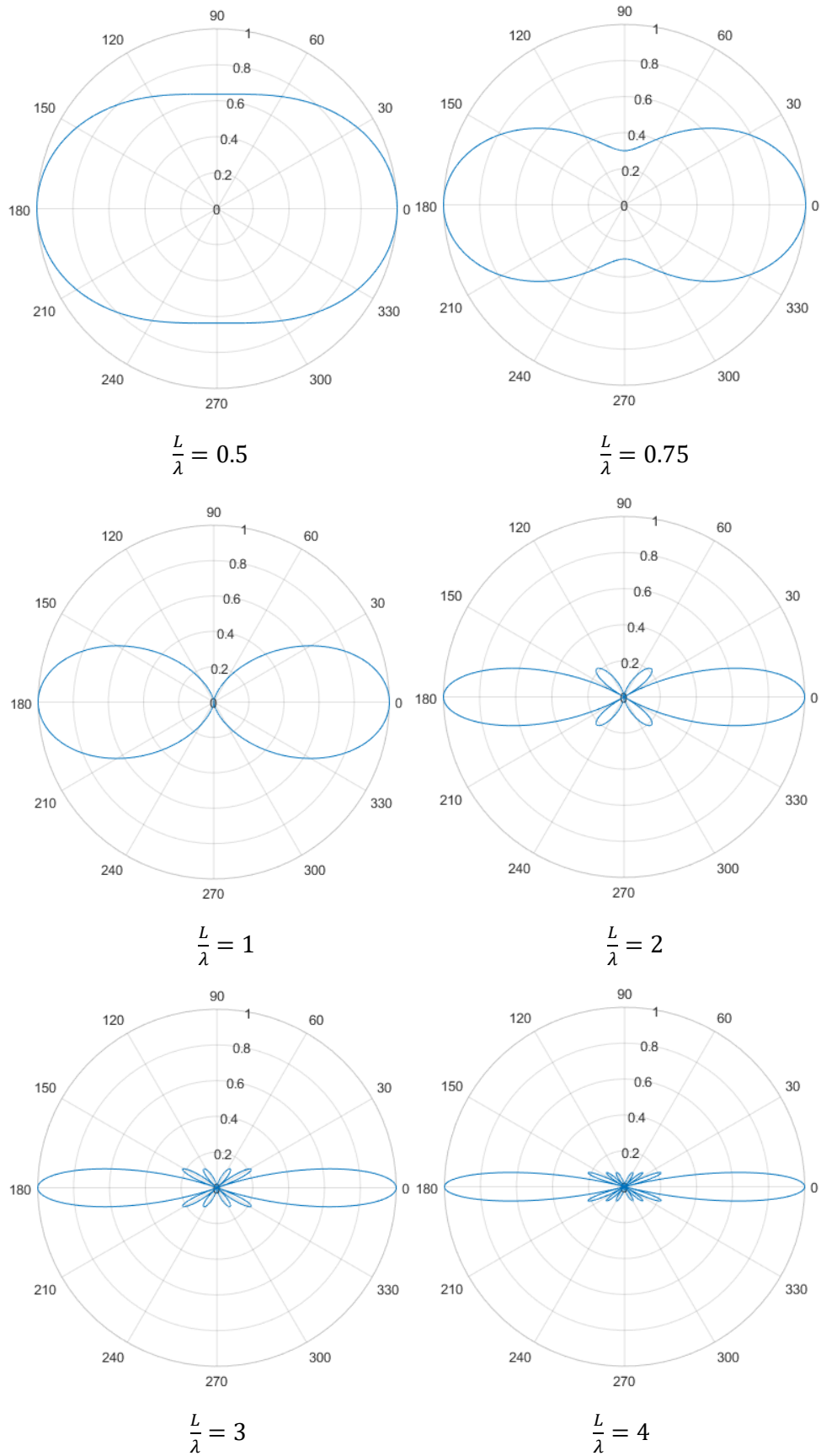
$$D(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{1}{2}kL\sin(\alpha)\right)}{\frac{1}{2}kL\sin(\alpha)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda}L\sin(\alpha)\right)}{\frac{\pi}{\lambda}L\sin(\alpha)} \quad (4.9)$$

siendo  $\alpha$  el ángulo respecto del eje.

Se puede observar que la directividad de una fuente lineal depende directamente de la longitud de la fuente y de la frecuencia emitida por ésta. En la Figura 4.6 se muestran diferentes diagramas polares variando el factor que relaciona la longitud de la fuente y la longitud de onda emitida,  $\frac{L}{\lambda}$ .

Los diagramas de directividad de la fuente lineal indican claramente que conforme aumenta el factor  $\frac{L}{\lambda}$  aumenta también la directividad de la fuente. Cuando la longitud de la fuente es menor que la longitud de onda de la frecuencia emitida la directividad es prácticamente omnidireccional, y según va aumentando la longitud con respecto a  $\lambda$  la fuente se vuelve más directiva.





*Figura 4.6. Diagramas de directividad de una fuente lineal variando la relación entre longitud de la fuente y frecuencia emitida.*

#### 4.3.2. Control de la directividad vertical

Cuando se utiliza un line array para una sonorización es muy importante poder controlar la directividad vertical de éste, para poder dirigir la energía acústica al público, evitando que se desperdicie en el caso de estar al aire libre, o que llegue a lugares donde pueda dar problemas produciendo reflexiones (en el techo, por ejemplo) en el caso de estar en un recinto cerrado.

Como ya se ha visto, para una misma frecuencia, cuando aumenta la longitud de la fuente ésta se vuelve más directiva. También se puede observar en la Figura 4.6 que si se aumenta mucho la longitud con respecto a la longitud de onda comienzan a aparecer lóbulos laterales y el haz principal se estrecha.

Por lo tanto, para que el line array cumpla con las características de directividad vertical deseadas deberá tener una longitud igual o superior a la longitud de onda de la frecuencia más baja que vaya a reproducir. Por otra parte, si el line array se excede de su longitud adecuada pueden producirse lóbulos laterales y un excesivo estrechamiento del haz principal, sobre todo a altas frecuencias.

#### 4.3.3. Ángulo de cobertura vertical

El ángulo de cobertura de una fuente lineal (el punto en el que el nivel sonoro de la fuente disminuye -6 dB con respecto al eje) se puede calcular como:

$$\theta_{-6dB} \approx \frac{24000}{fL} \quad (4.10)$$

siendo  $f$  la frecuencia y  $L$  la longitud de la fuente.

Este ángulo de cobertura es muy estrecho para altas frecuencias. Por ejemplo, un line array de una longitud de 4 metros emitiendo una frecuencia de 8 kHz tendría un ángulo de cobertura de 0.75°, claramente insuficiente.

Una manera de incrementar el ángulo de cobertura es mediante la técnica de “tapering”, que consiste en ajustar la amplitud a lo largo del line array, teniendo la máxima amplitud en el centro de la fuente lineal y la mínima en los extremos de la fuente.

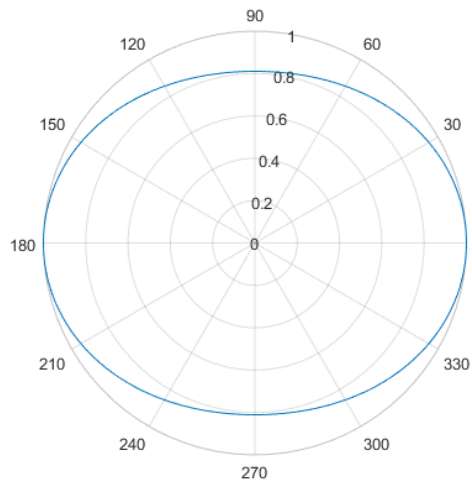
Esta técnica produce un lóbulo central más ancho que el que generaría un line array de la misma longitud, y además reduce el número de lóbulos laterales. El ángulo de cobertura resultante se puede calcular como:

$$\theta_{-6dB} = \frac{1.8\lambda}{L} \quad (4.11)$$

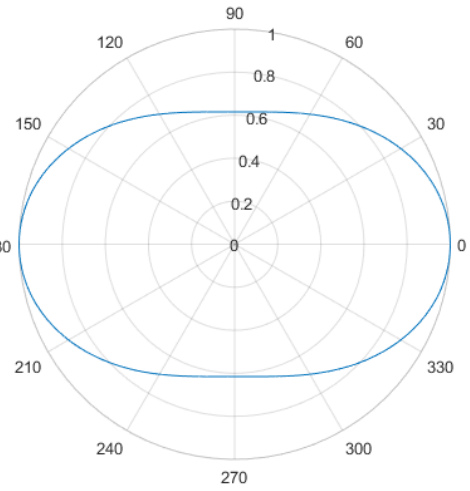
La función de directividad de un line array al cuál se le aplica la técnica del “tapering” se puede expresar de la siguiente manera:

$$D(\alpha) = \frac{\sin^2\left(\frac{1}{4}kL\sin(\alpha)\right)}{\left(\frac{1}{4}kL\sin(\alpha)\right)^2} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{2\lambda}L\sin(\alpha)\right)}{\left(\frac{\pi}{2\lambda}L\sin(\alpha)\right)^2} \quad (4.12)$$

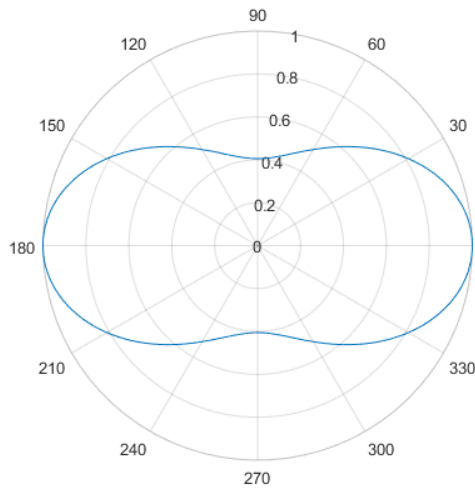
A continuación, se representan en la Figura 4.7 los diagramas polares para las mismas relaciones de  $\frac{L}{\lambda}$  que en el caso anterior.



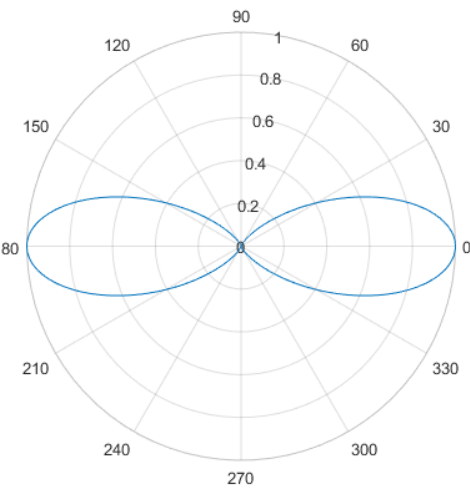
$$\frac{L}{\lambda} = 0.5$$



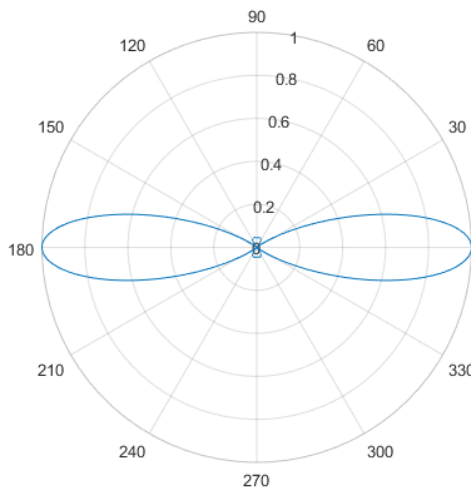
$$\frac{L}{\lambda} = 0.75$$



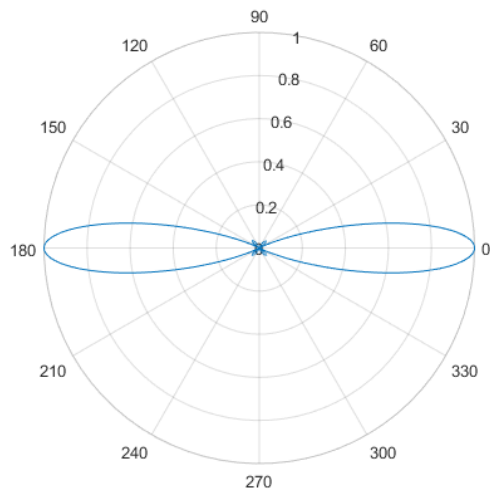
$$\frac{L}{\lambda} = 1$$



$$\frac{L}{\lambda} = 2$$



$$\frac{L}{\lambda} = 3$$



$$\frac{L}{\lambda} = 4$$

Figura 4.7. Diagramas de directividad de una fuente lineal aplicando "tapering".

#### 4.3.4. Fuente lineal de elementos discretos

La fuente lineal no deja de ser un modelo ideal el cual no es posible implementar en la realidad. La solución utilizada es crear una fuente lineal a partir de elementos discretos, de manera que éstos se comporten de una manera aproximada a como lo haría una fuente lineal. Para que las diferentes fuentes produzcan el mismo efecto que una única fuente es necesario que las fuentes se sumen de manera que no aparezcan lóbulos secundarios y se produzca un acoplamiento eficaz entre ellas. De esta manera el line array se comporta como una fuente lineal de sonido y además se produce una distribución uniforme del nivel de presión sonora con la distancia.

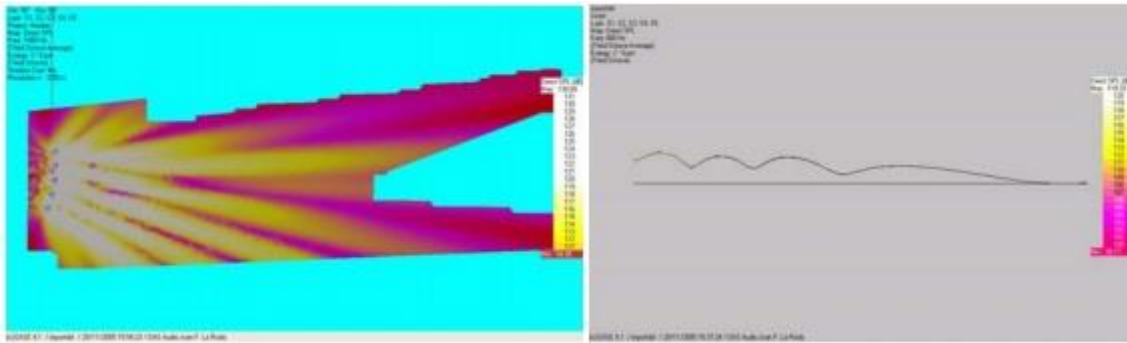


Figura 4.8. Distribución no uniforme del nivel de presión sonora con la distancia debida a la aparición de múltiples lóbulos.

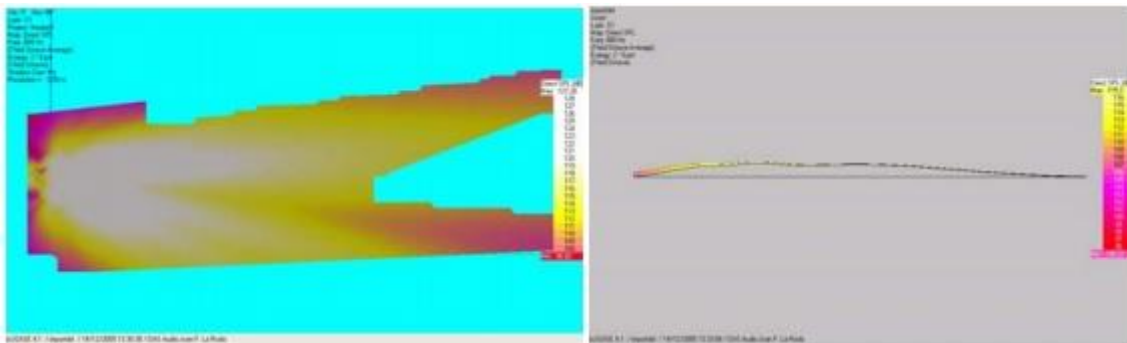


Figura 4.9. Distribución uniforme del nivel de presión sonora con la distancia debida a la existencia de un solo lóbulo principal.

##### 4.3.4.1. Suma acústica entre las fuentes que componen el line array

Como se ha visto ya en el apartado dedicado a la suma acústica, el hecho de que aparezcan más o menos lóbulos en el patrón de directividad de un arreglo depende tanto de la frecuencia como de la separación entre las fuentes. Por lo tanto, para que las fuentes se acoplen de una manera eficaz es necesario que la separación entre fuentes sea menor que media longitud de onda de la mayor frecuencia a reproducir ( $B \leq \frac{\lambda}{2}$ ).

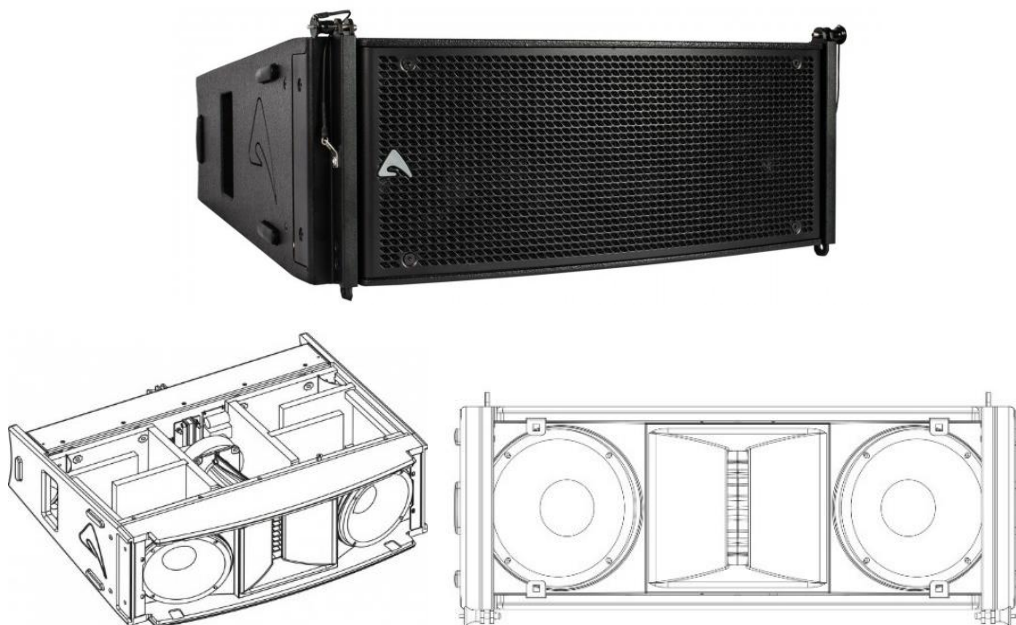
Esto implica que en el diseño de un line array hay que minimizar la distancia entre transductores, por eso las cajas que lo componen son estrechas y alargadas, ya que la separación entre los transductores está determinada por la altura de las cajas que los contienen.

Para bajas y medias frecuencias no hay problema en lograr una separación entre transductores que cumplan con la relación  $B \leq \frac{\lambda}{2}$ , puesto que son longitudes de onda cuyo tamaño es comparable al de los transductores que las reproducen, pero para las altas frecuencias no es

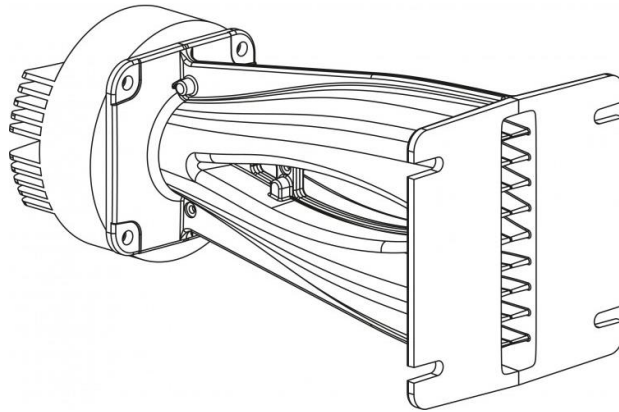
posible. Por ejemplo, para un equipo que vaya a reproducir frecuencias de hasta 20 kHz (el límite audible), la separación entre altavoces debería ser de 0.85 cm, ya que la longitud de onda de la máxima frecuencia a reproducir es de 1.7 cm. El problema es que no existen transductores lo suficientemente potentes de este tamaño tan pequeño.

La solución a este problema es utilizar dos tipos de altavoces diferentes, cada uno para un rango de frecuencias. Para las frecuencias bajas y medias se utilizan altavoces de directividad constante y para las frecuencias agudas se utilizan altavoces de directividad proporcional. Tanto unos como otros se montan en la misma caja.

Un altavoz de directividad proporcional incorpora una guía de ondas al motor de agudos, de manera que a la salida se crean varias fuentes, separadas entre sí una distancia igual o menor a media longitud de onda de la mayor frecuencia a reproducir. La guía de ondas actúa como un corrector de fase, ya que se crea un frente de onda isofásico, es decir, como si varias fuentes de agudos emitiesen todas ellas en fase. De esta manera se soluciona el problema de la separación entre fuentes.



*Figura 4.10. Aspecto exterior y estructura interna de una caja de line array de la marca Axiom, modelo AX2065P. En los laterales están situados los altavoces de directividad constante y entre ellos se encuentra el altavoz de directividad proporcional.*



*Figura 4.11. Altavoz de directividad proporcional del modelo Axiom AX2065P. El motor de agudos tiene incorporado una guía de ondas para crear un frente de onda isofásico.*

#### **4.3.5. Configuraciones**

La utilización de un array de altavoces en línea recta puede resultar insuficiente para cubrir todas las zonas de audiencia, que de hecho es uno de los requisitos que ha de cumplir una correcta sonorización. Por ejemplo, en un auditorio que disponga de varias zonas con diferentes alturas, con un patio de butacas y luego balcones a diversas alturas, un array en línea recta no sería una solución óptima para ofrecer una cobertura homogénea.

Además, la relación entre la longitud de la fuente lineal y la frecuencia hace que se pueda controlar la directividad, pero como contrapunto, este estrechamiento del patrón hace que a altas frecuencias el haz sea demasiado estrecho.

Para solucionar estos problemas existen diferentes configuraciones que se exponen a continuación.

##### **4.3.5.1. Array en curva**

Una posible solución para mejorar las prestaciones de un array en línea recta es un array en curva, en el que las fuentes están dispuestas a lo largo de un sector circular.



*Figura 4.12. Ejemplo de configuración de array en curva, con cajas de la marca QSC, modelo KLA12.*

Este tipo de arrays ofrecen una directividad más amplia que un array en línea recta. La función de directividad en campo lejano está determinada por la diferencia de distancia al campo lejano entre dos puntos cualesquiera a lo largo del sector circular. Esta distancia relativa se puede expresar como:

$$r_c(\sigma) = 2R \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \sin\left(\frac{\sigma}{2} + \alpha\right) \quad (4.13)$$

donde:

$R$  es el radio del sector circular

$\sigma$  es el ángulo respecto al eje del sector circular

$\alpha$  es el ángulo de desplazamiento con respecto al eje de la fuente

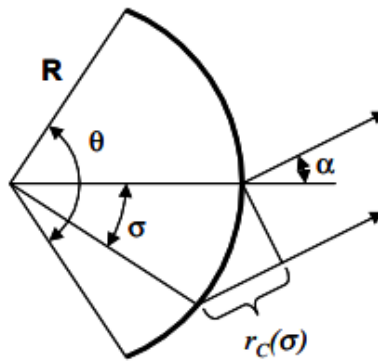


Figura 4.13. Representación geométrica de un array en curva.

La función de directividad de un array en curva se define de la siguiente manera:

$$D_c(\alpha) = \frac{1}{\theta} \left| \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} e^{-jkr_c(\sigma)} d\sigma \right| \quad (4.14)$$

siendo  $\theta$  el ángulo del sector circular.

En la Figura 4.14 se representan los diagramas polares (extraídos del artículo “J” and “Spiral” Line Arrays (Ureda, 2001)) de una array en curva con un ángulo de sector circular de  $60^\circ$  y con diferentes relaciones entre el radio ( $R$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ).

Aunque un array circular mejora en cierto modo las prestaciones de cobertura de un line array, ya que su curvatura permite que la parte inferior cubra la parte de la audiencia cercana a la fuente, presenta el inconveniente de que la parte superior de la fuente dirige el sonido hacia la parte superior del recinto, en caso de estar en un recinto cerrado, produciendo reflexiones, o directamente desperdiciando parte de la energía en caso de tratarse de un evento al aire libre.



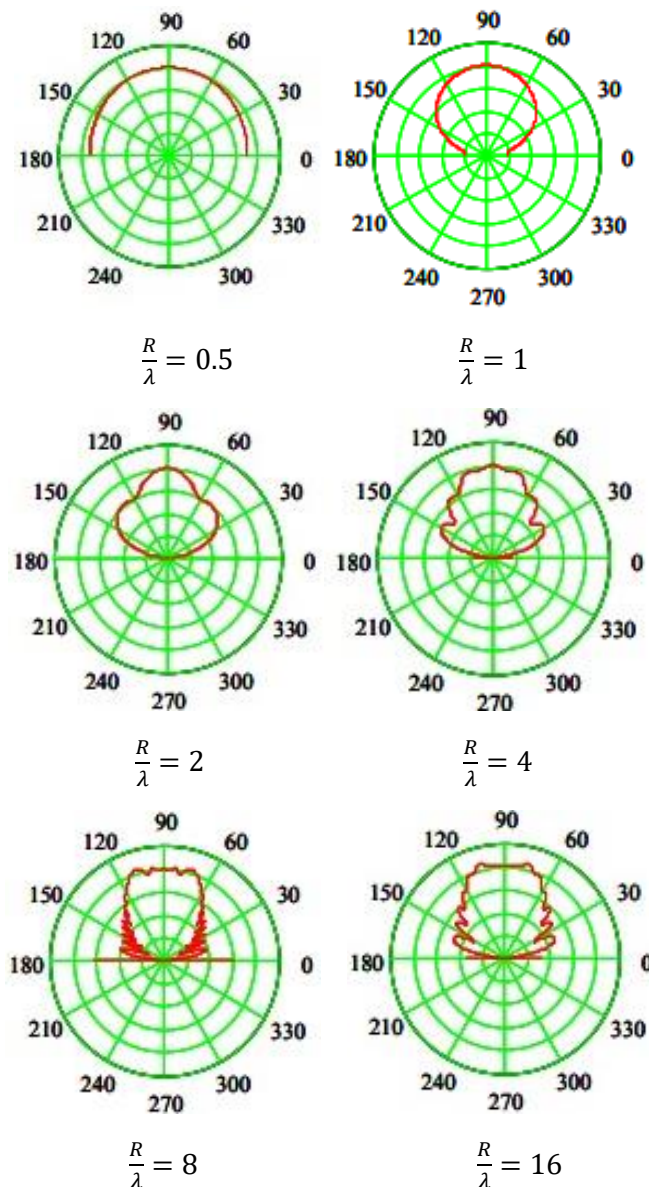


Figura 4.14. Diagramas de directividad de un array en curva con ángulo de sector circular de  $60^\circ$  para diferentes relaciones de  $\frac{R}{\lambda}$ .

#### 4.3.5.2. Array en "J"

Un array en "J" está compuesto por un line array y por un array en curva. Por lo general, el segmento en línea recta está situado encima del segmento en curva.

De esta manera, la parte superior envía la energía a las zonas de audiencia más alejadas ("tiro" largo) y la parte inferior proporciona cobertura a la parte del público más cercana al propio array ("tiro" corto). Así se consigue una cobertura más uniforme.

Esta configuración proporciona una respuesta polar asimétrica en el plano vertical. La función de directividad del array en "J" se obtiene combinando las funciones de directividad del line array y del array en curva. Mientras la parte en línea recta aporta el "tiro" largo y un haz estrecho, la parte en curva aporta un haz más ancho e inclinado hacia abajo.





Figura 4.15. Ejemplo de configuración de array en “J”, con cajas de la marca Electro-Voice, modelo X2-212/90.

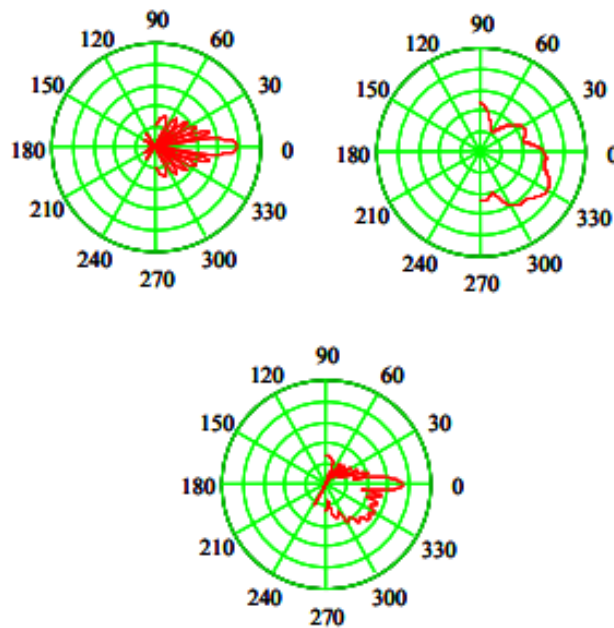


Figura 4.16. Diagramas polares (Ureda, 2011) a 1 kHz de un line array de 2 metros de longitud (arriba a la izquierda), un array en curva con ángulo de sector circular de 60° y radio de 1 metro (arriba a la derecha) y el “J” array resultante de la combinación de ambos.

La directividad de este tipo de arrays depende de diversos factores: la longitud del segmento en línea recta, el radio y el ángulo del sector circular, la amplitud relativa entre cada uno de los dos segmentos y la frecuencia emitida.

A continuación, se muestran en la Figura 4.17 los diagramas polares (Ureda, 2011) para diferentes frecuencias de un array en “J” con una longitud de 2 m del sector en línea recta, 1 m de radio y un ángulo de 60° del sector circular y con la misma amplitud en ambos segmentos.

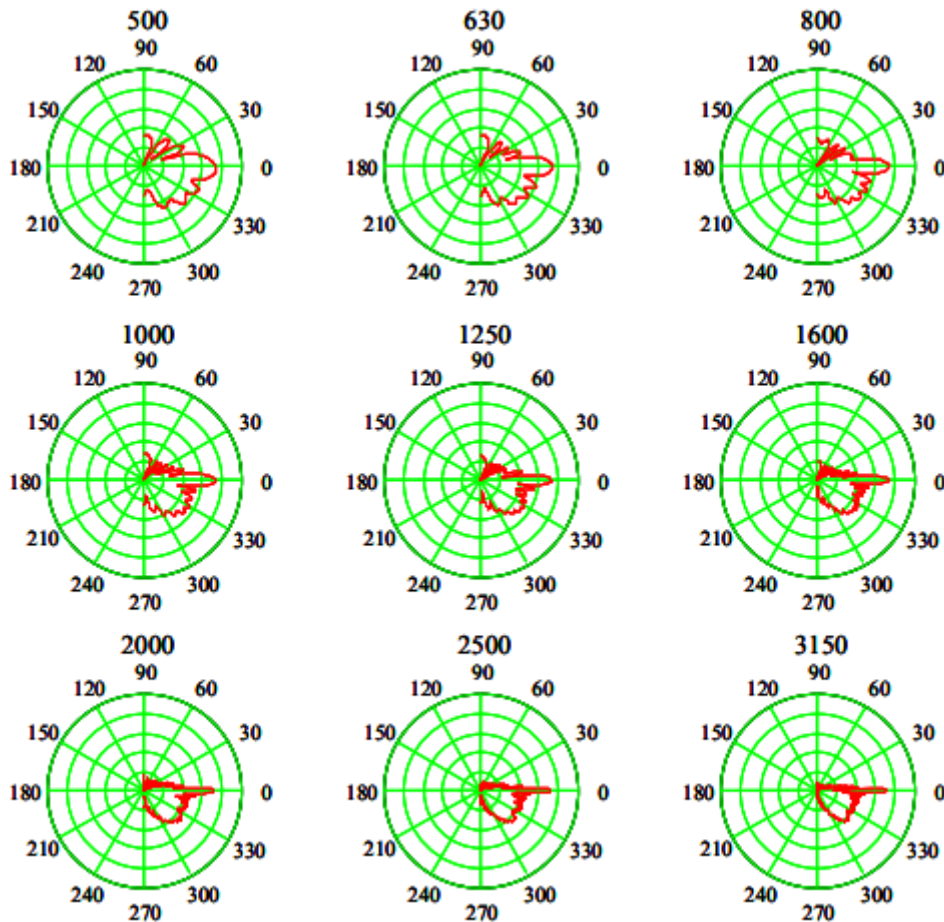


Figura 4.17. Diagramas polares para diferentes frecuencias de un array en "J" donde  $L = 2 \text{ m}$ ,  $R = 1 \text{ m}$ ,  $\theta = 60^\circ$  y misma amplitud en ambos segmentos.

El problema que puede surgir de la utilización de este tipo de arrays es que el segmento en línea recta produce un haz muy estrecho y con más nivel con respecto al que proporciona la parte curvada, sobre todo a altas frecuencias, dando lugar a una respuesta polar un poco desequilibrada. Esto se puede solucionar de varias maneras, por ejemplo haciendo que la parte en línea recta sea más corta, o incrementando la ganancia de la parte curva con respecto a la recta.

Otra manera de equilibrar la respuesta es curvando el array desde la parte superior, sin dejar que haya ninguna parte totalmente en línea recta. Este tipo de arrays se denominan arrays en espiral.

#### 4.3.5.3. Array en espiral

El array en espiral comienza su curvatura desde la parte superior del mismo, y ésta aumenta con la longitud del array.

Un ejemplo es el array en espiral aritmética. El ángulo entre las sucesivas cajas que conforman el array va cambiando por un ángulo predeterminado ( $\Delta\theta$ ). Por ejemplo, la caja de la parte superior puede estar con una inclinación de  $0^\circ$ , la siguiente a  $1^\circ$  con respecto a la anterior, la siguiente a  $2^\circ$ , y así sucesivamente. De esta manera, con un  $\Delta\theta = 1^\circ$ , el ángulo de inclinación de las sucesivas cajas que conforman el array sería  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $10^\circ$  y así sucesivamente. En el caso

de utilizar un  $\Delta\theta = 2^\circ$ , la inclinación de las cajas sería  $0^\circ, 2^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 20^\circ$  y así sucesivamente. El ángulo en el que termina el arreglo en espiral se puede hallar mediante la expresión:

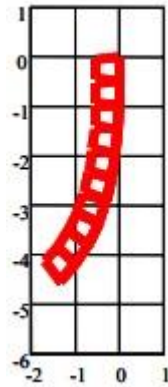
$$\Omega = \frac{1}{2}n(1+n)\Delta\theta \quad (4.15)$$

siendo  $n$  el número de cajas que componen el array.

La longitud total del array se calcula como:

$$L = nH \quad (4.16)$$

donde  $H$  es la altura de cada una de las cajas.



*Figura 4.18. Array en espiral aritmética con  $n = 10$ ,  $L = 5$  y  $\Omega = 45^\circ$ .*

El diagrama polar que proporcionan este tipo de arrays es bastante constante con la frecuencia. En la Figura 4.19 se pueden observar los diagramas polares (Ureda, 2001) para diferentes frecuencias de un array en configuración de espiral aritmética con las características del mostrado en la Figura 4.18.

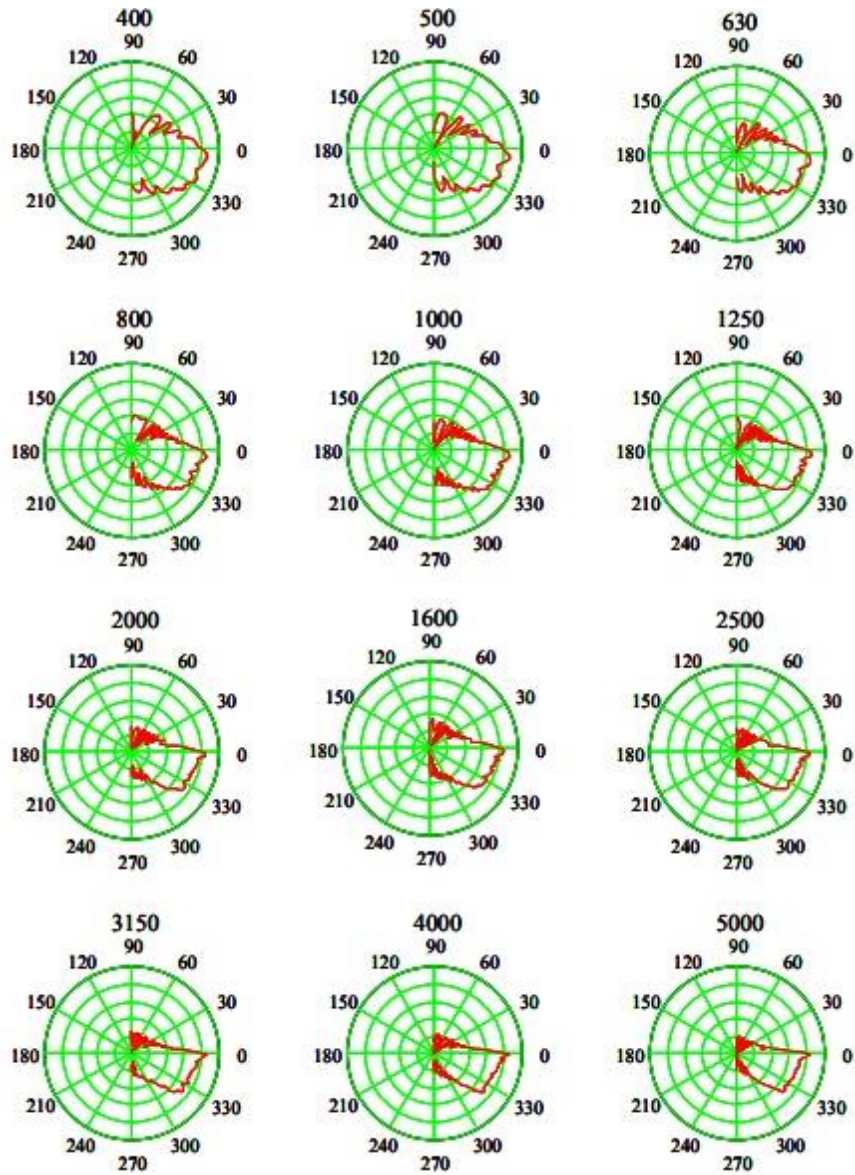


Figura 4.19. Diagramas polares para diferentes frecuencias de un array en espiral logarítmica con  $L = 5$  y  $\Omega = 45^\circ$ .

## 5. Proceso de modelado del recinto con EASE

### 5.1. Descripción del recinto

El recinto sobre el que se va a llevar a cabo la propuesta de sonorización es el Polideportivo Ignacio Pinedo, ubicado en el Centro Deportivo Universidad Carlos III de Madrid, en el campus de Getafe.

Se trata de un pabellón polideportivo cubierto en el que se pueden practicar tanto deportes colectivos (voleibol, fútbol sala, baloncesto, balonmano) como individuales (bádminton, tenis de mesa). La pista central se puede dividir a su vez en tres zonas diferentes, de manera que se pueden acoger varias actividades simultáneamente.

El polideportivo cuenta con un aforo de 700 personas, y acoge competiciones deportivas de liga interna universitaria de modalidades de deporte de equipo (fútbol sala, baloncesto y voleibol) y competiciones del campeonato universitario de Madrid de baloncesto y voleibol, donde se compite con el resto de universidades de la Comunidad de Madrid. Además, en el polideportivo se celebran también exhibiciones de gimnasia rítmica.

La pista dispone de un campo de fútbol sala de 40 m x 20 m, y una cancha de baloncesto de 28 m x 15 m. Los tercios en los que se divide la pista mediante cortinas divisorias tienen unas dimensiones de 23 m x 14 m.



*Figura 5.1. Interior del Polideportivo Ignacio Pinedo*





*Figura 5.2. Interior del Polideportivo Ignacio Pinedo con las cortinas divisorias desplegadas.*

## **5.2. Creación del modelo con EASE**

El objetivo del modelado del recinto con el software EASE es poder simular el comportamiento acústico del recinto para el que se va a proponer un sistema de refuerzo sonoro (capítulo 6). De esta forma, se podrá comprobar las prestaciones del sistema en un entorno lo más parecido posible al real. Por ello es necesario crear un modelo que se asemeje lo más posible a cómo es el recinto en la realidad.

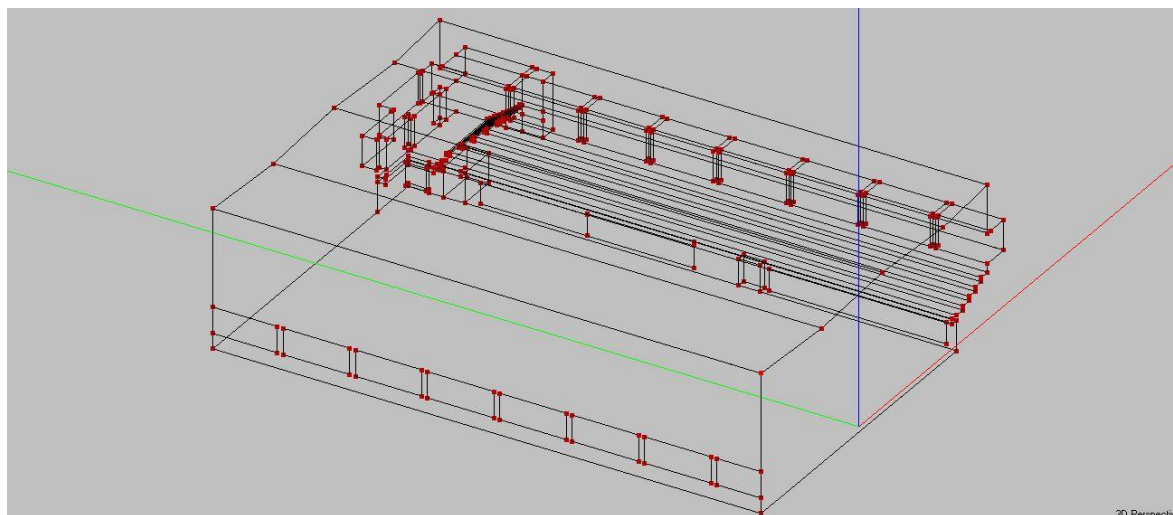
El proceso de creación del modelo consta de dos partes. Por un lado, hay que incluir la información geométrica del recinto, y por otro lado la información de los materiales presentes en las superficies del mismo. Una vez creado el modelo con la información necesaria sobre su geometría, hay que asignar materiales a cada una de las superficies que lo forman para así caracterizar su comportamiento acústico. Tanto la información geométrica como el tipo de materiales acústicos están sujetos a una cierta incertidumbre relacionada con la falta de información. Por ejemplo, en la construcción del modelo se realizan algunas simplificaciones en la geometría. Además, es común no conocer exactamente el comportamiento acústico de los materiales que componen el recinto. Por esta razón, todo modelo virtual lleva asociado un proceso de ajuste o calibración basado en medidas 'in situ' realizadas en el propio recinto (apartado 5.3).

Ante la imposibilidad de acceder a los planos del recinto fue necesario obtener sus dimensiones y toda la información sobre su geometría utilizando un metro láser y construyendo el modelo a partir de cero.

El diseño fue llevado a cabo en diferentes fases, empezando por una primera versión en la que se creó el recinto con sus partes más básicas. Posteriormente se fueron añadiendo elementos hasta lograr una versión que se aproxima a la forma real del recinto. Para ello fue necesario ir al recinto en varias ocasiones para obtener las medidas geométricas.

En primer lugar, se obtuvieron las medidas necesarias para crear una primera versión del recinto, con cierto nivel de detalle, pero sin dibujar algunos elementos de las gradas que fueron añadidos posteriormente. En cuanto a la pista, no se incluyó la parte de las pistas de squash, limitándose solamente a la pista principal. En esta primera versión se modelaron las columnas, las ventanas y las puertas de acceso a la pista.

Esta primera versión del modelo constaba de 304 vértices y 169 superficies.

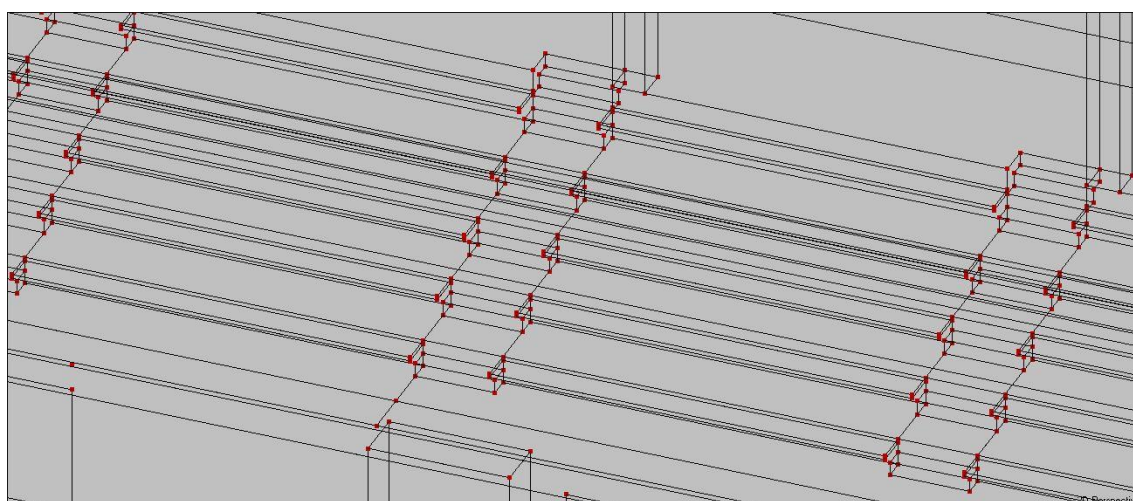


*Figura 5.3. Primera versión del modelo creado con EASE.*

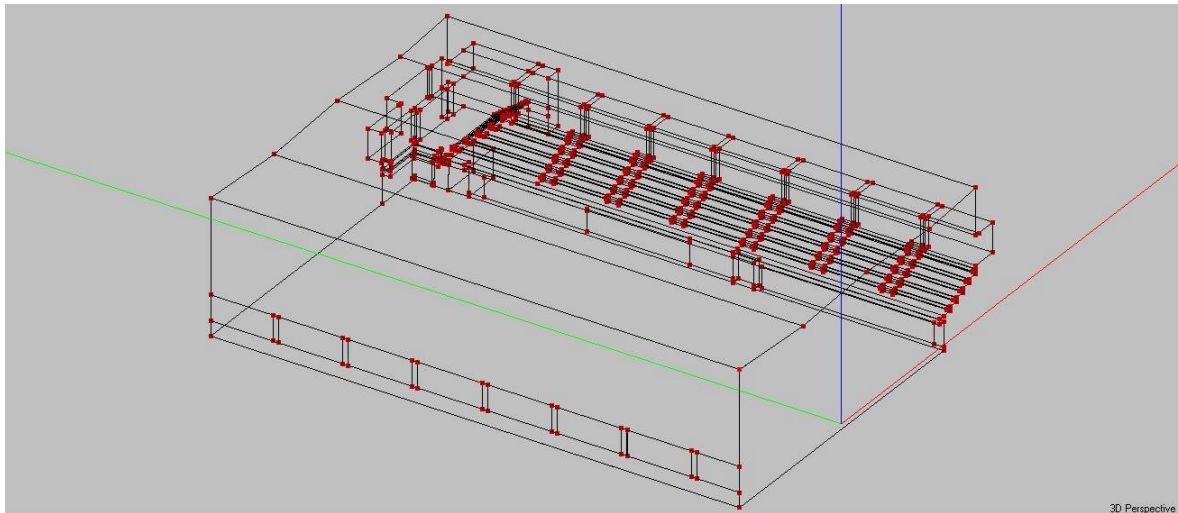
Tras la creación de esta primera versión se procedió a volver al recinto para medir, con el fin de modelar con mayor nivel de detalle la parte de las gradas.

En la segunda versión del modelo se representaron los bancos para el público, las escaleras de las gradas y el balcón. Tanto los bancos como las escaleras se representaron detalladamente y con las medidas exactas, ya que diferían dependiendo de la zona en la que se encontraban, tratando de lograr una aproximación lo más parecida posible a la realidad.

Esta versión constaba de 903 vértices y 631 caras.



*Figura 5.4. Detalle de los bancos y las escaleras de las gradas.*

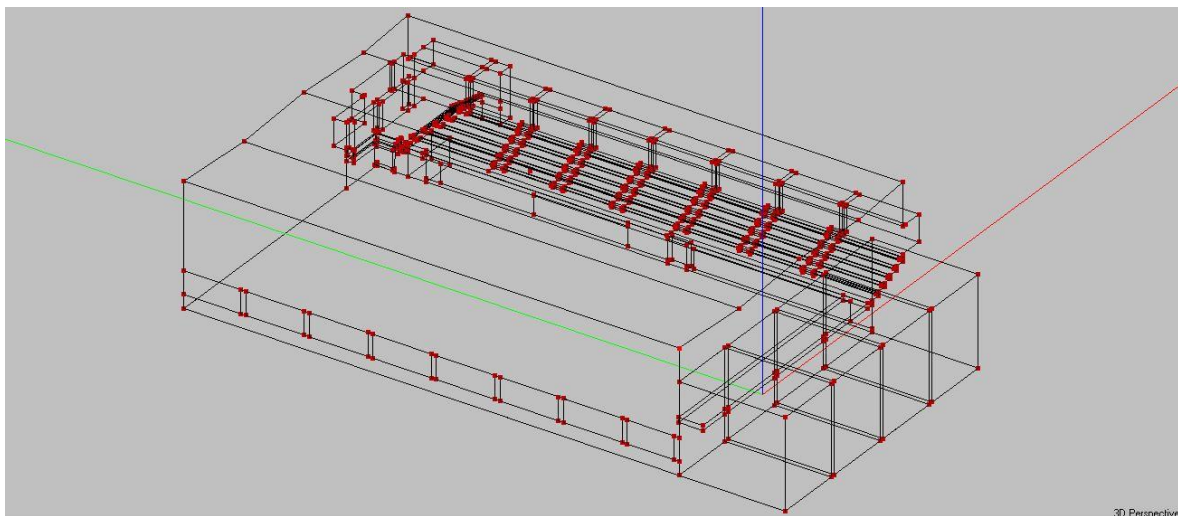


*Figura 5.5. Segunda versión del modelo creado con EASE.*

El siguiente paso en el proceso de creación del recinto fue modelar la parte contigua a la pista principal, en la que se encuentran las pistas de squash.

De nuevo, fue necesario ir al recinto para medir las dimensiones de las pistas de squash y del resto de elementos existentes en esta parte del recinto que no se había modelado con anterioridad. En esta versión se representaron las pistas de squash, la pasarela y el acceso a la pista existente en esa parte del recinto.

Esta versión constaba de 955 vértices y 688 superficies.

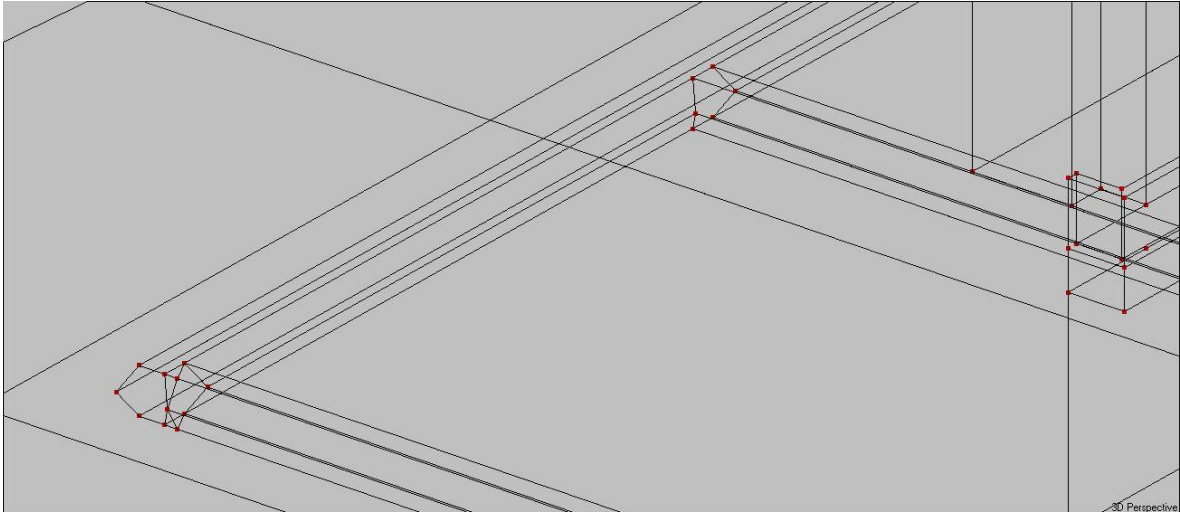


*Figura 5.6. Tercera versión del modelo creado con EASE.*

Por último, se creó una versión definitiva incluyendo todos los elementos que no se habían incluido en las versiones anteriores, obteniendo de esta manera un mayor nivel de detalle. En esta última versión se incluyeron las tuberías del techo, las canastas, las cortinas divisorias (recogidas) y se trataron de modelar las espalderas ubicando en su posición una superficie de las mismas dimensiones. También se modelaron las vidrieras de las pistas de squash, que no se crearon en la versión anterior.

Para el modelado de las tuberías fue necesario realizar una aproximación de su geometría mediante hexágonos, ya que el software no permite la creación de superficies curvas.

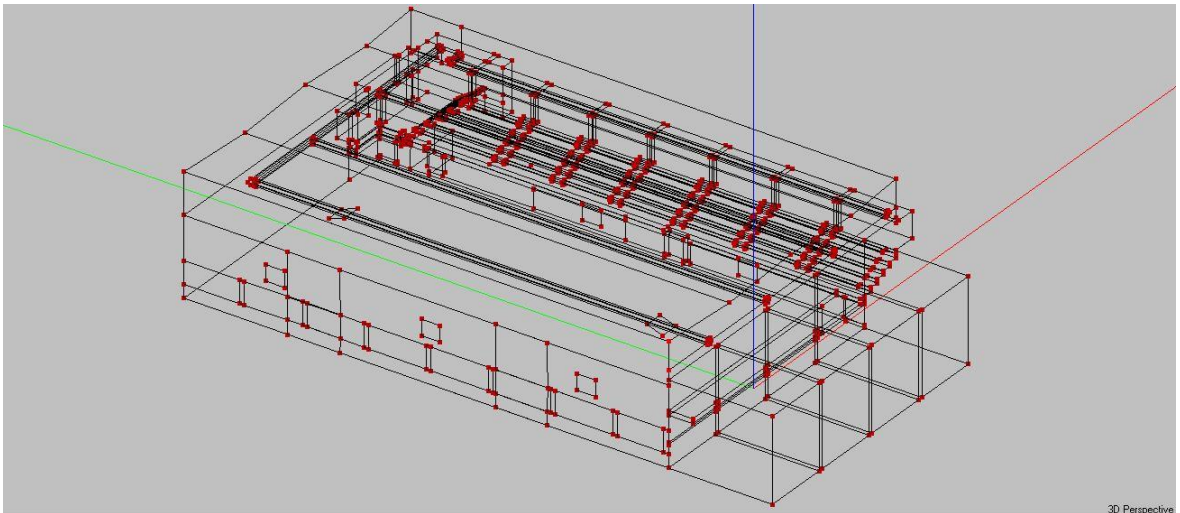




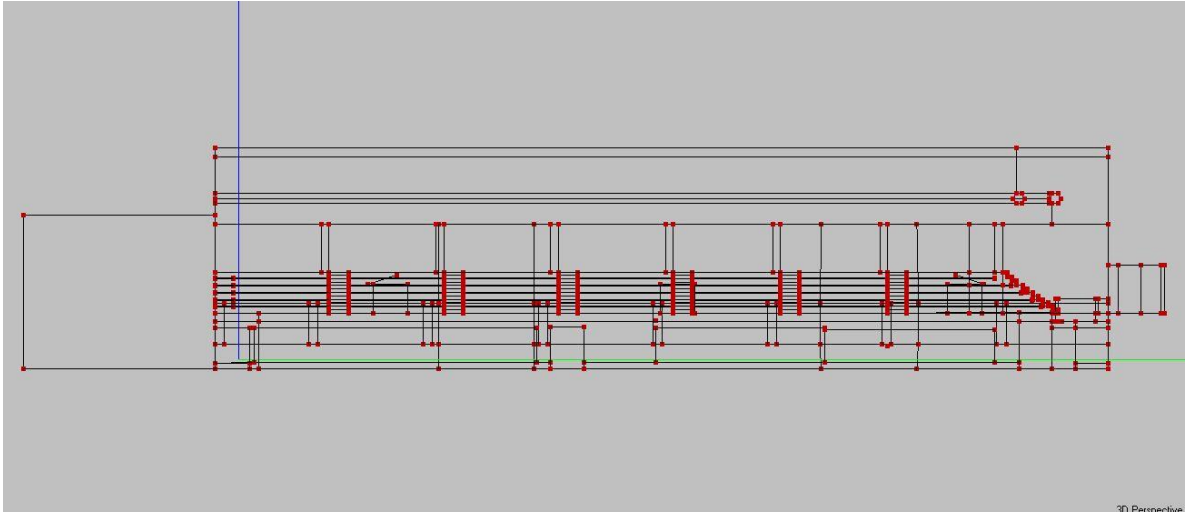
*Figura 5.7. Aproximación a la forma de las tuberías mediante hexágonos.*

En esta parte del proceso de modelado también se volvieron a modelar las paredes del recinto, creando dos partes diferenciadas, ya que los materiales eran diferentes, a fin de poder realizar un mejor ajuste en caso de tener que cambiar los materiales asignados en un principio.

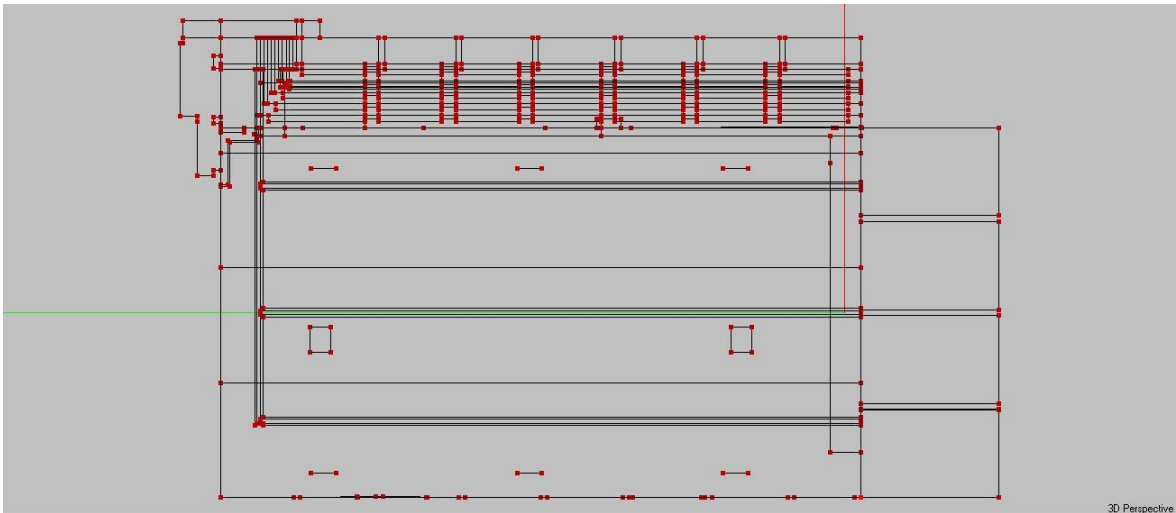
La versión definitiva del modelo consta de 1107 vértices y 753 superficies.



*Figura 5.8. Versión definitiva del modelo creado con EASE.*



*Figura 5.9. Vista lateral de la versión definitiva del modelo.*



*Figura 5.10. Vista en planta de la versión definitiva del modelo.*

### **5.3. Ajuste del modelo**

Una vez creado el modelo del recinto, es necesario llevar a cabo un ajuste de los materiales asignados inicialmente, para que las simulaciones llevadas a cabo con el software sean los más cercanas a la realidad posible. Existen diferentes formas para realizar este ajuste, difiriendo principalmente en la magnitud utilizada. En este trabajo, el ajuste se basa en la medida y simulación del nivel de presión sonora sin ponderación frecuencial,  $L_{Zeq}$ . El ajuste se realiza modificando los coeficientes de absorción de los materiales hasta aproximar los valores obtenidos en el recinto con los obtenidos mediante simulación.

Las mediciones tenían que realizarse en total ausencia de actividad dentro del recinto, para evitar ruidos de fondo que influyeran en las medidas obtenidas, y sin personas en lugares cercanos a la pista principal del polideportivo, que es donde se iban a realizar las mediciones, debido al elevado nivel de presión sonora necesario, que puede llegar a ser perjudicial sin la correspondiente protección auditiva.

Estos factores reducían las posibilidades de acceso al recinto para realizar las mediciones. Los únicos momentos en los que era posible realizarlas eran los sábados en los periodos de 6:00 a 9:00 y de 15:00 a 18:00. El periodo de 6:00 a 9:00 quedó descartado por motivos logísticos, por lo que sólo quedaba la opción de utilizar el periodo de 15:00 a 18:00, dejando previamente marcados los puntos de medida, de manera que las tres horas disponibles se utilizasen sólo para montar el equipo, realizar las mediciones y recoger.

#### **5.3.1. Método de ajuste por niveles de presión**

El método de ajuste por niveles de presión consiste en medir nivel de presión sonora en campo reverberante, es decir, en puntos situados a una distancia de la fuente superior a la distancia crítica.

El nivel de presión sonora en campo reverberante se puede expresar como:

$$L_r = L_W + 10 \log \left( \frac{4}{R} \right) \quad (5.1)$$

siendo  $L_W$  el nivel de potencia acústica de la fuente y  $R$  la constante del recinto.

La constante del recinto ( $R$ ) se calcula como:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (5.2)$$

siendo  $S$  la superficie del recinto y  $\bar{\alpha}$  el coeficiente de absorción medio.

Por lo tanto, para un mismo nivel de potencia acústica de la fuente ( $L_W$ ), los coeficientes de absorción de los materiales son el único parámetro variable que influye en el nivel de presión sonora en campo reverberante.

De esta manera, variando los coeficientes de absorción de los materiales asignados inicialmente en la primera aproximación del modelo se pueden aproximar los valores de nivel de presión sonora obtenidos 'in situ' con los valores obtenidos con el software, logrando así ajustar el modelo.

#### **5.3.2. Procedimiento para el ajuste del modelo**

El procedimiento llevado a cabo para realizar el ajuste fue el siguiente:

- Definición de los puntos de medida
- Medidas 'in situ'
- Obtención y procesado de los datos
- Ajuste del modelo mediante el cambio de materiales

#### **5.3.3. Definición de los puntos de medida**

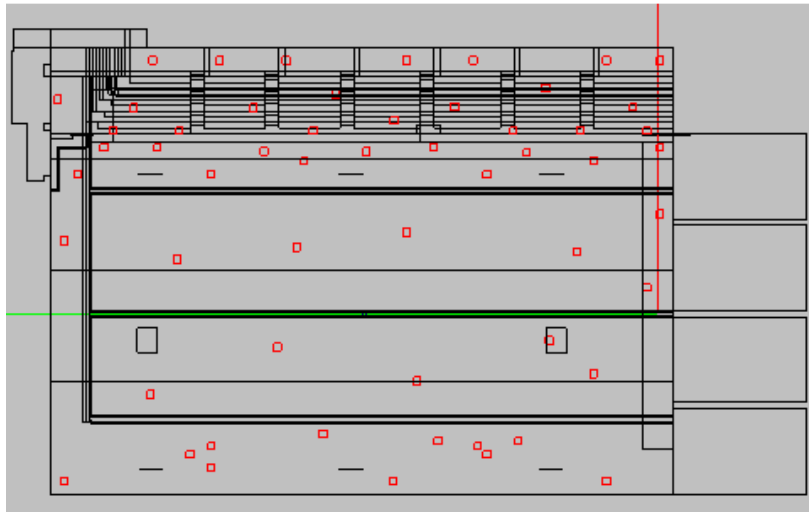
Se definieron un total de 56 puntos de medida que se distribuyeron de la siguiente manera:

- 21 puntos en las gradas.
- 35 puntos en la pista.

Para optimizar el tiempo del que se disponía para realizar las mediciones (3 horas, en el periodo de 15:00 a 18:00), los puntos de medida fueron marcados durante la mañana del mismo día,

antes de ir a recoger el equipo de medida. Esto permitió utilizar las 3 horas disponibles para obtener las medidas necesarias.

A continuación, se muestra en la Figura 5.11 la distribución definitiva de los puntos de medida.



*Figura 5.11. Puntos de medida*

#### **5.3.4. Medidas ‘in situ’**

El siguiente paso es realizar las mediciones en el recinto para obtener los valores reales de niveles de presión.

Las mediciones fueron llevadas a cabo el día 22 de julio de 2017. La pista se encontraba vacía y no se estaba llevando a cabo ninguna actividad en ninguna de las estancias contiguas, ya que el polideportivo estaba cerrado al público para realizar las labores de limpieza.

Las mediciones se realizaron con las cortinas divisorias recogidas. Las seis canastas situadas en los laterales de la pista (tres en la zona de las gradas y otras tres en la zona de las ventanas y las cortinas divisorias), correspondientes a las tres posibles divisiones de la pista, se encontraban en su posición normal, y las dos canastas de la pista principal estaban recogidas.



*Figura 5.12. Situación en la que se encontraban las cortinas divisorias y las canastas de los laterales*



*Figura 5.13. Posición en la que se encontraban las canastas de la pista principal durante las mediciones.*

#### **5.3.4.1. Equipo necesario**

El equipo necesario para realizar las mediciones se compone de:

- Fuente dodecaédrica

La fuente dodecaédrica es una fuente con un patrón de directividad aproximadamente omnidireccional. De esta manera se intenta crear un campo lo más difuso posible.

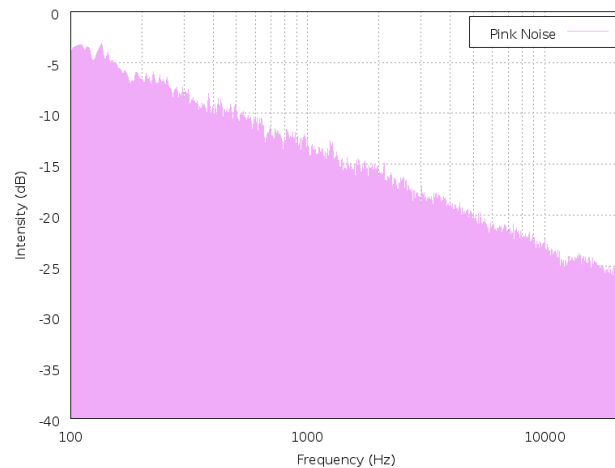


*Figura 5.14. Fuente dodecaédrica utilizada para las mediciones.*

- Generador de ruido rosa

La fuente dodecaédrica fue excitada con ruido rosa. Este tipo de ruido tiene la particularidad de que su densidad espectral de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia, decayendo 3 dB por octava.

Para este tipo de mediciones se puede utilizar tanto ruido rosa como ruido blanco (cuya densidad espectral de potencia es constante). La utilización de ruido rosa se debe a que el nivel de ruido de fondo existente en el recinto es mayor a baja frecuencia, con lo que se logra que haya una diferencia de nivel suficiente entre el sonido emitido por la fuente y el ruido de fondo para todas las frecuencias.



*Figura 5.15. Densidad espectral del ruido rosa.*

Para generar el ruido rosa se utilizó un generador de ruido, capaz de generar tanto ruido rosa como ruido blanco.



*Figura 5.16. Generador de ruido rosa utilizado.*

- Amplificador de potencia

Es necesario amplificar la señal proveniente del generador de ruido antes de enviarla a la fuente dodecaédrica. Para ello se utilizó un amplificador de la marca Crest Audio, el modelo CA6.



La salida del generador fue conectada a la entrada de uno de los dos canales de entrada del amplificador, y la salida del canal se conectó a la fuente dodecaédrica.



*Figura 5.17. Amplificador Crest Audio CA6 utilizado para amplificar la señal de ruido rosa.*

- Calibrador sonoro

El calibrador sonoro fue utilizado para comprobar la correcta calibración de los analizadores sonoros utilizados.

- Analizadores sonoros

Se utilizaron dos analizadores sonoros Bruel&Kjaer del mismo modelo, el 2250 light. Esto permitió realizar mediciones simultáneamente reduciendo el tiempo de medida.

Los analizadores sonoros se utilizaron para medir tanto el ruido de fondo como los niveles de presión sonora con la fuente dodecaédrica en funcionamiento, y fueron configurados para obtener los valores de nivel continuo equivalente ( $L_{Zeq}$ ) durante 30 s en bandas de un tercio de octava.



*Figura 5.18. Sonómetro Bruel&Kjaer 2250 light.*

Al verificar la calibración con el calibrador sonoro, se comprobó que existía un pequeño desajuste entre los valores obtenidos por ambos analizadores sonoros. Posteriormente, se procesaron las medidas para corregir los niveles obtenidos por uno de ellos, estableciendo el otro como referencia.

#### **5.3.4.2. Verificación de la calibración de los analizadores sonoros**

Tanto antes como después de realizar las mediciones de ruido de fondo y de niveles de presión sonora con la fuente en funcionamiento se procedió a comprobar la correcta calibración de cada uno de los dos analizadores sonoros utilizados.

La verificación anterior a las medidas dio como resultado 93.6 dB (para el analizador sonoro utilizado en las gradas) y 93.8 dB (para el usado en la pista). Las verificaciones finales corroboraron el buen comportamiento de los analizadores.

Debido a los valores obtenidos en la verificación, se decidió establecer como sonómetro de referencia el que da un resultado más cercano al patrón (94.0 dB del calibrador sonoro).

#### **5.3.4.3. Medición del ruido de fondo**

Cuando se realizan este tipo de mediciones es preciso obtener los valores de ruido de fondo existentes en el recinto sin estar la fuente sonora en funcionamiento. Esto se hace para comprobar que los valores de nivel de presión sonora obtenidos con la fuente en funcionamiento se deben exclusivamente a ésta y a la influencia del recinto, y no al propio ruido de fondo existente.

Las mediciones de ruido de fondo se realizaron tanto antes como después de obtener las medidas de los 56 puntos del polideportivo. En las gradas se realizaron cuatro mediciones, dos antes de medir con la fuente en funcionamiento y otras dos después. En la zona de pista se obtuvieron una medida antes de conectar la fuente y otras dos después.

#### **5.3.4.4. Medición de niveles de presión sonora con la fuente en funcionamiento**

Para obtener los niveles de presión sonora con la fuente en funcionamiento se distribuyeron los dos analizadores sonoros en dos zonas diferentes. Con uno se obtuvieron las medidas correspondientes a los puntos de medida situados en las gradas y con el otro se realizaron las mediciones correspondientes a los puntos de medida de la pista. La fuente dodecaédrica se situó en el centro de la pista.

El procedimiento seguido fue enviar la señal amplificada de ruido rosa a la fuente dodecaédrica, dejar un periodo de tiempo de unos segundos para que el campo sonoro alcanzase el estado estacionario, y una vez transcurrido este tiempo comenzar a obtener las medidas simultáneamente tanto en las gradas como en la pista.



*Figura 5.19. Fuente dodecaédrica y analizador sonoro en uno de los puntos de la pista*



#### **5.3.4.5. Mediciones para la corrección de uno de los analizadores sonoros**

Para corregir las medidas obtenidas con el analizador sonoro que estaba más desajustado, se procedió a medir con ambos sonómetros a 2 m de la fuente con ésta en funcionamiento, a fin de utilizar las medidas obtenidas de  $L_{Zeq}$  por tercio de octava por cada uno de los sonómetros para establecer una curva de corrección.

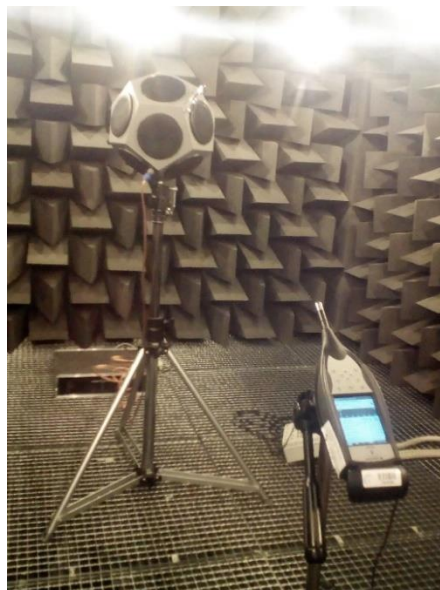


*Figura 5.20. Sonómetro situado a 2 m de la fuente*

#### **5.3.4.6. Medición de la fuente en cámara anecoica**

Con objeto de obtener los niveles de presión sonora de la fuente, necesarios para la simulación en EASE, se llevó a cabo la medición de éstos en la cámara anecoica del campus de Leganés de la Universidad Carlos III.

Es necesario introducir en el software los valores de SPL a 1 m de distancia en las bandas de tercio de octava que abarcan desde la banda con frecuencia central en 100 Hz hasta la banda con frecuencia central en 10 kHz.



*Figura 5.21. Fuente dodecaédrica y analizador sonoro en la cámara anecoica*

La altura a la que se situó la fuente fue la misma que durante las mediciones en el polideportivo, a 1.5 m del suelo.

El analizador sonoro utilizado fue el mismo que se utilizó como referencia para corregir los datos obtenidos. Se situó a 1.7 m del centro acústico de la fuente y a una altura de 1.2 m con respecto al suelo.

Antes de realizar las mediciones se procedió a verificar la calibración del sonómetro, obteniendo de nuevo un valor de 93.8 dB.

Tras la comprobación de la calibración se procedió a medir el nivel de la fuente. Se realizaron dos mediciones, una de un minuto y medio y otra de tres minutos.

El potenciómetro del canal del amplificador (con el que se regula su ganancia a la salida) se posicionó en el mismo punto que cuando fue utilizado durante las mediciones 'in situ'. De esta manera se aseguraba que el nivel de presión sonora iba a ser el mismo.

El último paso fue volver a comprobar la calibración del sonómetro, obteniéndose un valor de 93.8 dB.

### **5.3.5. Obtención y procesado de los datos**

Los datos utilizados para realizar el ajuste del modelo son los valores de nivel continuo equivalente sin ponderar ( $L_{Zeq}$ ) entre las bandas de tercio de octava con frecuencias centrales de 100 Hz y 10 kHz, ya que el software sólo maneja ese rango de frecuencias

El periodo de tiempo configurado en el sonómetro para obtener la medida de  $L_{Zeq}$  fue de 30 s.

Entre los datos proporcionados por el sonómetro se encuentran los datos correspondientes a la evolución temporal durante los 30 s de duración de cada medida, en intervalos de 1 s. Estos datos sirvieron para comprobar la validez de las medidas, desechando aquellas en las que se observaron anomalías, debidas a ruidos externos al lugar donde se estaban obteniendo las medidas.

Los datos obtenidos con el sonómetro fueron exportados a archivos Excel.

#### **5.3.5.1. Niveles de ruido de fondo**

En primer lugar, se examinó la evolución temporal de las medidas obtenidas de ruido de fondo para comprobar si había anomalías que hiciesen necesario desechar alguna. Se observó gráficamente la posible aparición de aumentos bruscos de nivel para cada banda de tercio de octava durante los 30 segundos que duró cada medición.

A la vista de los resultados se decidió desechar dos de las medidas obtenidas en las gradas y dos de las medidas obtenidas en pista. Por otra parte, de una de las medidas de las gradas se optó por desechar la parte inicial y de otra de las medidas de las gradas se desechó la parte final, por presentar aumentos bruscos de nivel. Para cada una de estas dos medidas se obtuvo el nivel continuo equivalente sin ponderar  $L_{Zeq}$  (5.3) una vez eliminadas las partes que presentaban cambios bruscos de nivel.

$$L_{Zeq,T_t} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_t} \sum_{i=1}^N T_i 10^{L_{Zeq,i}/10} \right] \quad (5.3)$$

donde  $T_t$  es el tiempo total (en segundos) de cada medida y  $T_i$  es la duración de cada intervalo de medida, en este caso 1 segundo.

Estas dos medidas se obtuvieron con el analizador sonoro que presentaba cierto desajuste, por lo que fue necesario corregirlas mediante el método explicado en el siguiente apartado.

Por último, se obtuvo el nivel promedio (5.4) de las tres medidas válidas:

$$L_{Zeq} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Zeq i}/10} \right] \quad (5.4)$$

siendo  $N$  el número de medidas.

A continuación, se muestran en la Tabla 5.1 los valores de ruido de fondo para cada tercio de octava una vez promediados.

100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz
33.2	28.9	30.4	30.7	29.2	29.5	31.9	31.5	33	31.9	30.2
1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz	6.3 kHz	8 kHz	10 kHz	
29.5	27.8	24.6	21.9	19	17.6	14	12.5	11.3	11.7	

Tabla 5.1. Niveles promedio de ruido de fondo por tercio de octava.

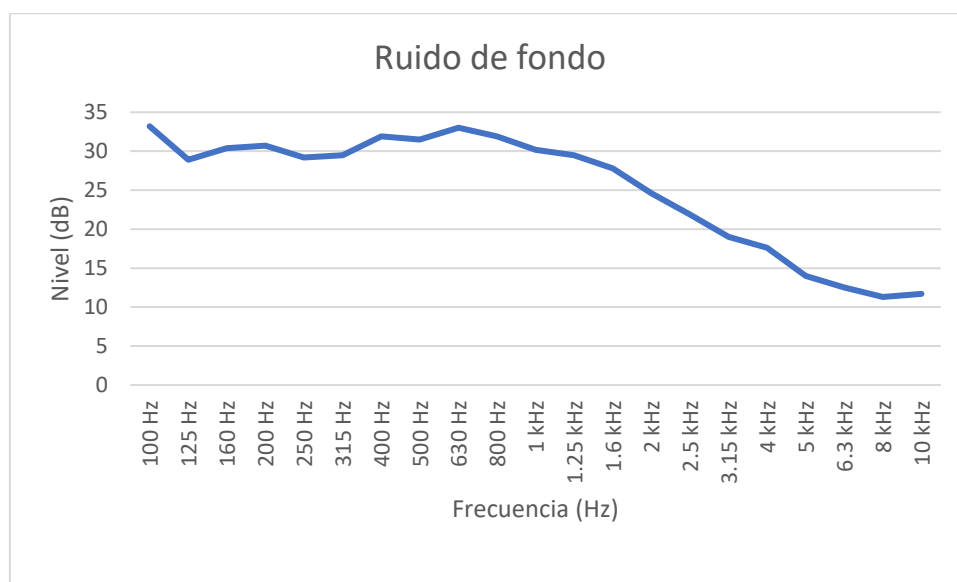


Figura 5.22. Niveles promedio de ruido de fondo por tercio de octava.

A la vista de los resultados se determinó que no era necesaria una corrección por ruido de fondo.

#### 5.3.5.2. Niveles de presión sonora con la fuente en funcionamiento

Al igual que se procedió con las medidas de ruido de fondo, se llevó a cabo un análisis de la evolución temporal de las medidas obtenidas a fin de observar anomalías. No se observó ninguna, por lo que todas las medidas fueron dadas como válidas.

Tras comprobar la validez de las medidas fue preciso corregir las medidas obtenidas por uno de los sonómetros. Para ello se utilizaron los datos de nivel de presión sonora equivalente  $L_{Zeq}$  obtenidos a 2 metros de distancia de la fuente sonora por cada uno de los sonómetros.

El procedimiento seguido fue, en primer lugar, obtener el nivel promedio (5.4) para cada analizador sonoro de las medidas obtenidas a 2 metros de la fuente (dos con un sonómetro y tres con otro) y después restar estos niveles, para obtener así la diferencia entre el sonómetro de referencia y el que necesitaba ser corregido (Tabla 5.2).

100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz
0.2	-0.2	0	0.3	0.7	0.9	0.6	0.3	-0.8	0.3	0.4
1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz	6.3 kHz	8 kHz	10 kHz	
0	0.5	0.1	0.5	0.7	1.3	0.9	1.5	0.9	0.7	

Tabla 5.2. Valores utilizados para la corrección.

Tras aplicar la corrección correspondiente, se obtuvieron los valores de  $L_{Zeq}$  por tercio de octava entre 100 Hz y 10 kHz para las 56 posiciones de medida. Estos valores son los que se utilizaron posteriormente para ajustar el modelo (Tabla 5.3, al final del capítulo), comparándolos con los niveles obtenidos mediante simulación.

### 5.3.5.3. Niveles de presión sonora de la fuente en la cámara anecoica

Los valores obtenidos en la cámara anecoica con la fuente en funcionamiento correspondían al nivel de presión sonora a 1.7 m, por lo que fue necesario aplicar una corrección por distancia a los valores obtenidos, a fin de saber el nivel de presión sonora 1 m, que es el dato que hay que introducir en el software. Para ello se aplicó la siguiente fórmula a los valores obtenidos en cada tercio de octava:

$$SPL(1\text{ m}) = SPL(1.7\text{ m}) + 20\log(1.7) \quad (5.5)$$

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz
SPL(1.7m)	86	88.4	92.2	92.1	91.9	90.7	89.3	87.5	86.8	85.7	83.5
SPL(1m)	90.7	93.2	96.9	96.9	96.6	95.4	94	92.2	91.5	90.4	88.2
	1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz	6.3 kHz	8 kHz	10 kHz	
SPL(1.7m)	83.7	87.5	83.3	83.5	84.5	81	82.4	83.4	74.4	68.9	
SPL(1m)	88.4	92.2	88	88.2	89.2	85.8	87.2	88.1	79.2	73.7	

Tabla 5.4. Valores de  $L_{Zeq}$  obtenidos en la cámara anecoica con la fuente en funcionamiento, y su correspondiente corrección por distancia.

### 5.3.6. Ajuste del modelo mediante el cambio de materiales

El último paso para aproximar el modelo diseñado mediante el software al modelo real consiste en ir cambiando los materiales asignados en un principio a las superficies del recinto hasta que los niveles de presión sonora obtenidos mediante simulación se aproximen a los obtenidos ‘in situ’.

#### 5.3.6.1. Margen de ajuste de las medidas

Para establecer un margen de ajuste en las medidas se calculó la incertidumbre de las medidas obtenidas ‘in situ’. Se procedió a obtener un valor de incertidumbre por tercio de octava para cada medida, de manera que cada resultado se pueda expresar como:

$$y \pm U$$

siendo  $y$  el resultado y  $U$  el margen debido a la incertidumbre.

Se determinaron dos componentes que podían influir en la incertidumbre de las medidas. Por un lado, está la componente relacionada con la repetición de las medidas (tipo A), ya que éstas tuvieron una duración de 30 s cada una, obteniéndose valores de  $L_{Zeq}$  cada 1 s y calculando

después el  $L_{Zeq}$  correspondiente a 30 s. Por otro lado, está la componente correspondiente a la instrumentación (tipo B), en este caso del sonómetro.

Con estos parámetros se calculó la incertidumbre típica combinada de las medidas. Para la componente de tipo A se decidió agrupar las 30 medidas de cada tercio de octava para cada punto en seis grupos de 5 segundos cada uno, para calcular después el  $L_{Zeq}$  (5.4) correspondiente a esos 5 segundos, y después calcular la desviación estándar de la media de las seis medidas. La decisión de considerar submedidas de 5 segundos de duración se ha basado en el RD1367/2007, donde indica que el menor tiempo de medida para medidas de ruido ambiental es 5 segundos.

Para ello, se halló primero la varianza experimental de las seis medidas de  $L_{Zeq}$  por cada tercio de octava (5.6), y de después se calculó la desviación estándar de la media (5.7), obteniendo el parámetro  $u_A(q)$ .

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (5.6)$$

siendo:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

$n$  el número de medidas

$$u_A(q) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (5.7)$$

Para la componente de instrumentación correspondiente al sonómetro ( $u_B(q)$ ) se utilizó un valor de  $\pm 1$  dB, obtenido de la normativa internacional UNE-EN ISO 1996-2:2009.

La incertidumbre típica combinada se calculó como:

$$u(q) = \sqrt{u_B(q)^2 + u_A(q)^2} \quad (5.8)$$

Por último, se obtuvo el valor de la incertidumbre expandida (5.9), multiplicando la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura  $k$ , utilizando el valor estándar de  $k = 2$ , ofreciendo un margen de cobertura del 95%.

$$U = k u(q) \quad (5.9)$$

En la Tabla 5.5 mostrada al final de este capítulo se exponen, a modo informativo, los valores de incertidumbre expandida obtenidos para cada medida.

A la vista de los resultados obtenidos de incertidumbre expandida se estableció un margen de ajuste de  $\pm 2$  dB con respecto a las medidas ‘in situ’.

#### **5.3.6.2. Inserción de la fuente y de los puntos de medida**

En primer lugar, hay que insertar en el software una fuente omnidireccional, al igual que la utilizada durante las mediciones ‘in situ’. Para ello, EASE dispone de la fuente *SPHERE*, una fuente omnidireccional ideal. La altura de la fuente se sitúa a la misma que durante las mediciones ‘in situ’ (1.5 m), y se sitúa en el mismo punto de la pista.

Es necesario introducir los valores de SPL a 1 metro (Figura 5.23) para llevar a cabo la simulación. Los valores introducidos son los obtenidos en la cámara anecoica, con su correspondiente corrección por distancia.

Los puntos de medida han de estar situados en los mismos puntos en los que se obtuvieron las medidas 'in situ', y a la misma altura (1.2 m). La manera de introducir los puntos de medida en EASE es mediante los asientos de escucha (*Listener Seats*). Los *Listener Seats* son puntos específicos introducidos por el usuario en los que el software lleva a cabo simulaciones de diferentes parámetros acústicos. Se introdujeron en el modelo construido mediante el software 56 puntos de medida en las mismas posiciones y a la misma altura que durante las mediciones llevadas a cabo 'in situ'.

Frequ.	Ele.Power	SPL (1m)
100 Hz	1.172	90.69
125 Hz	2.070	93.16
160 Hz	4.943	96.94
200 Hz	4.842	96.85
250 Hz	4.560	96.59
315 Hz	3.475	95.41
400 Hz	2.500	93.98
500 Hz	1.663	92.21
630 Hz	1.422	91.53
800 Hz	1.094	90.39
1000 Hz	0.661	88.20
1250 Hz	0.689	88.38
1600 Hz	1.663	92.21
2000 Hz	0.637	88.04
2500 Hz	0.662	88.21
3150 Hz	0.839	89.24
4000 Hz	0.378	85.77
5000 Hz	0.521	87.17
6300 Hz	0.649	88.12
8000 Hz	8.241E-02	79.16
10000 Hz	2.323E-02	73.66

Figura 5.23. Valores de SPL a 1 m introducidos en EASE.

### 5.3.6.3. Simulación de niveles de presión sonora en los puntos de medida

Una vez insertados tanto la fuente omnidireccional como los puntos de medida, hay que obtener los valores de SPL mediante simulación para poder compararlos con los valores registrados 'in situ'.

El proceso de ajuste es muy laborioso, ya que hay que simular el SPL total, comparar los niveles obtenidos con las medidas 'in situ', y después probar a cambiar los materiales susceptibles de modificar los niveles o editar sus coeficientes de absorción para volver a repetir el mismo proceso, así hasta lograr unos resultados que se aproximen.

Para ello se utilizó la herramienta *Area mapping*, obteniendo los valores de SPL total en cada asiento de escucha. Esta herramienta utiliza la teoría estadística para llevar a cabo los cálculos del nivel de presión sonora total. Tras obtener los resultados de la primera prueba, se compararon con los obtenidos 'in situ'.

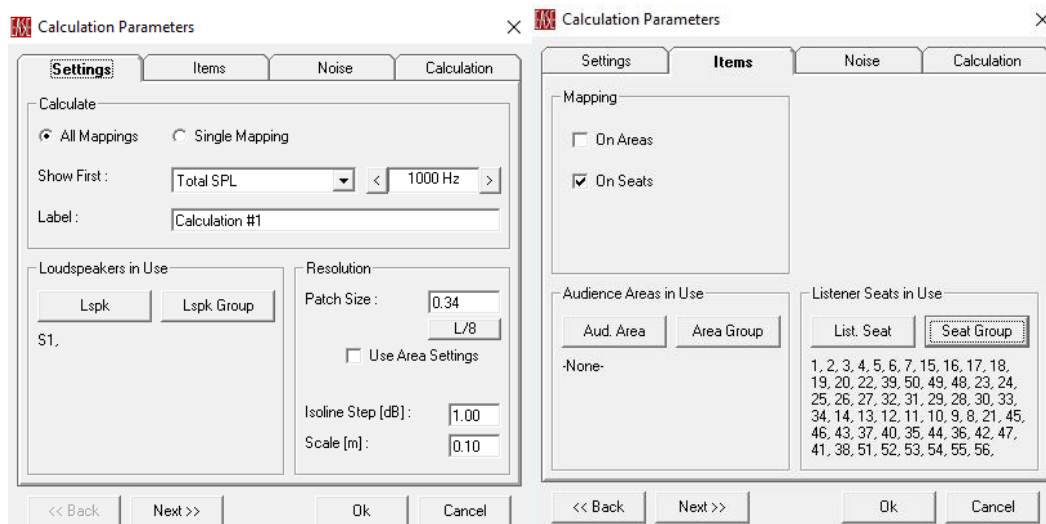


Figura 5.24. Configuración de las opciones para el cálculo del Area mapping.

Tras esta primera prueba, se observaron diferencias de nivel notables tanto a bajas como a altas frecuencias en prácticamente todos los puntos de medida. Para tratar de reducir estas diferencias de nivel, se procedió a editar o cambiar los materiales sobre los cuales había dudas acerca de sus coeficientes de absorción, ya que el resto de materiales (hormigón, ladrillo pintado, vidrio...) poseen unos coeficientes de absorción conocidos.

En primer lugar, se probó a cambiar el material asignado inicialmente al techo, ya que al desconocer su material se le había asignado el mismo que a las paredes de hormigón, para ser ajustado posteriormente mediante las pruebas realizadas. Debido a la gran superficie que ocupa con respecto a la superficie total del recinto (techo sobre la pista y techo de las pistas de squash), se pensó que podría tener influencia en todo el recinto, por lo que, a la vista de las grandes diferencias de nivel a bajas y a altas frecuencias y el desconocimiento de su material, se editó un material con un alto coeficiente de absorción a esas frecuencias, para así comprobar su influencia en los resultados. También se realizaron cambios en algunos materiales asignados inicialmente para comprobar las diferencias en los resultados.

Tras los primeros cambios, se siguieron realizando pruebas y comparando los resultados con los valores obtenidos 'in situ'. Se observó la alta influencia del techo sobre el total de los valores obtenidos, por lo que se fueron variando sus coeficientes de absorción para intentar ajustar lo más posible los resultados.

Además, se cambió el material de los recintos de las pistas de squash, ya que se observó su alta influencia en los puntos de medida más próximos a esta zona. De esta manera, se fueron probando diferentes coeficientes de absorción y se observó que también ejercían influencia en todo el recinto.

También se cambiaron los materiales asignados a las partes del recinto que estaban abiertas: los accesos a la pista y la parte abierta de la zona de gradas. A estas partes se les asignó inicialmente el material *ABSORBER*, que tiene un coeficiente de absorción de valor 1 para todas las frecuencias. Este material es el que se asigna normalmente en caso de haber superficies que dan al exterior del recinto. En este caso no daban al exterior sino al resto del complejo deportivo, por lo que la absorción no era total. Se asignó para estas zonas un material con un coeficiente de absorción del 50% para todas las frecuencias. El problema es que estas zonas ocupan una

superficie muy pequeña en comparación con la superficie total del recinto, por lo que su influencia en el modelo es más bien baja.

Tras varias pruebas, se observó cierta mejoría en el proceso de ajuste del modelo. No obstante, seguía habiendo diferencias a bajas frecuencias en las gradas, y, sobre todo, a altas frecuencias en todo el recinto.

La diferencia de nivel a bajas frecuencias en las gradas hizo pensar que tal vez los bancos, debido a su forma y su material, estaban ejerciendo un efecto resonador. Los resonadores son elementos contruidos con materiales rígidos y no porosos a los cuales se les practican una serie de perforaciones circulares o ranuras, y ejercen de absorbentes selectivos, sobre todo a bajas frecuencias. Por ejemplo, el resonador múltiple de cavidad a base de listones está formado por un conjunto de listones de espesor  $D$  equiespaciados y situados a una distancia  $d$  de una pared rígida (Figura 5.25). A la vista de la forma y el material de los bancos de las gradas se pensó que tal vez estaban influyendo de manera parecida a como lo hace un resonador acústico de estas características.

Teniendo en cuenta esto, se probó a editar los coeficientes de absorción de los bancos de las gradas cambiando el material que se había asignado inicialmente, *WOOD FLR*, el cual tiene unos coeficientes de absorción muy bajos. Tras varias pruebas, se asignó un material con altos coeficientes de absorción a bajas frecuencias, lo cual hizo que mejorasen notablemente los resultados.

Tras estos cambios, se compararon los resultados obtenidos con los valores obtenidos 'in situ' teniendo en cuenta la incertidumbre de estos, ya que las superficies grandes que se había observado que influían en todo el recinto no tenían más margen de mejora.

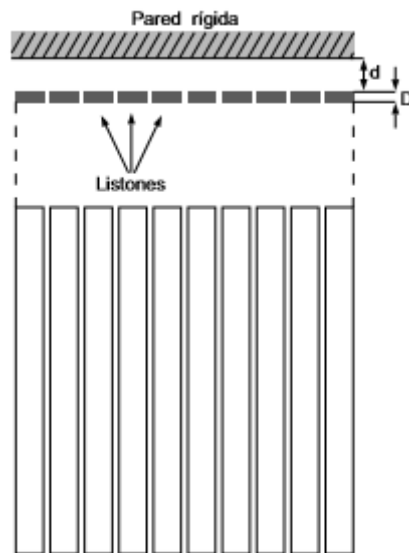


Figura 5.25. Resonador múltiple de cavidad a base de listones.





*Figura 5.26. Imagen detallada de los bancos de las gradas.*

#### **5.3.6.4. Comparación de los resultados**

Tras examinar y comparar los valores de cada punto de medida por cada tercio de octava obtenidos mediante el software con los obtenidos 'in situ' (Tabla 5.6), se observó que 909 medidas estaban dentro del margen de tolerancia de las 1176 medidas totales. Es decir, un 77.3% de las medidas estaban ajustadas dentro del margen.

A la vista de los resultados, se decidió dar por bueno el ajuste de los materiales, ya que, como se ha dicho anteriormente, las superficies que influían en todo el recinto habían sido ya ajustadas, y el cambio de materiales en las superficies pequeñas no tenían apenas influencia en los valores obtenidos. Además, cabe citar que el criterio que se ha planteado para valorar el ajuste del modelo puede que sea demasiado restrictivo. Se ha considerado que un punto de medida a una determinada frecuencia se consideraba ajustado cuando el valor del modelo se encontraba en el margen  $[L_{Zeq}-U, L_{Zeq}+U]$ , siendo  $L_{Zeq}$  el valor medido en esa frecuencia, y  $U$  la incertidumbre de medida. Puede que fuera más sensato considerar que el software también tiene una incertidumbre, y tenerla en cuenta en la comparación. Sin embargo, ante la imposibilidad de encontrar datos en relación a dicha incertidumbre del modelo, se ha optado por no tenerla en cuenta, aun sabiendo que puede que dé lugar a un criterio demasiado restrictivo.

Las mayores diferencias en los resultados se encuentran en los puntos situados en la franja central de la pista, obteniéndose valores más altos en las medidas 'in situ'. Tras los cambios realizados en el techo no se observó ninguna mejora en estas diferencias, por lo que se pensó que podía estar influyendo algún elemento del techo que no se tuvo en cuenta durante el modelado del recinto. El techo dispone de vigas y focos que no fueron modelados debido a la dificultad que entraña crear todos estos elementos en el software, y se intentó modelar mediante la edición de los coeficientes de absorción del material. Observando las diferencias de nivel en puntos situados en una parte específica del recinto es posible que algún elemento reflectante no tenido en cuenta estuviese influyendo en esa zona específica, produciendo un aumento del nivel de presión sonora en estos puntos específicos.

A parte de los puntos situados en el centro de la pista, hay otros dos puntos, 21 y 22, donde los valores difieren bastante. Estos puntos se encuentran en lugares cuya geometría se aproximó debido a la dificultad que entrañaba. El punto 21 se encuentra en la parte abierta de la zona de

gradas y el punto 22 en el acceso a la pista situado al lado de las pistas de squash, por lo que es posible que las diferencias en esos puntos se deban a la dificultad de representar geométricamente las zonas en las que se encuentran.

Analizando los resultados también se observan las diferencias de nivel a alta frecuencia en prácticamente todos los puntos del recinto. Esto se puede deber a la absorción del propio aire, que aumenta en recintos grandes y a altas frecuencias. La disminución del sonido propagado a través del aire depende no solo de la distancia entre la fuente y el receptor, sino también del coeficiente de atenuación del aire (expresado en dB/km), el cuál varía con la temperatura y la humedad relativa y aumenta a medida que aumenta la frecuencia (Tabla 5.7). Al no tener datos sobre las condiciones atmosféricas no fue posible introducir los valores de temperatura y humedad relativa en el software. Esta dependencia que tiene la absorción del aire de las condiciones atmosféricas y la frecuencia puede ser una posible causa de las diferencias existentes a altas frecuencias.

Se podría intentar lograr una mejora de las prestaciones del ajuste utilizando otra herramienta de cálculo de niveles de presión sonora que proporciona el software, que realiza los cálculos mediante el trazado de rayos y para ello tiene en cuenta los coeficientes de *scattering* de los materiales. Este método presenta el inconveniente del elevado tiempo de procesamiento que requiere para realizar los cálculos, y no garantiza la consecución de mejores resultados. Queda para un posible trabajo futuro realizar un ajuste del modelo mediante este método y analizar si se mejoran los resultados obtenidos.

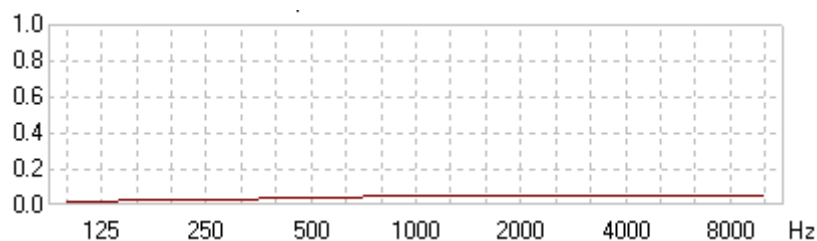
T (°C)	Humedad relativa (%)	Frecuencia (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
30	10	0.96	1.8	3.4	8.7	29	96
	20	0.73	1.9	3.4	6.0	15	47
	30	0.54	1.7	3.7	6.2	12	33
	50	0.35	1.3	3.6	7.0	12	25
	70	0.26	0.96	3.1	7.4	13	23
	90	0.20	0.78	2.7	7.3	14	24
20	10	0.78	1.6	4.3	14	45	109
	20	0.71	1.4	2.6	6.5	22	74
	30	0.62	1.4	2.5	5.0	14	49
	50	0.45	1.3	2.7	4.7	9.9	29
	70	0.34	1.1	2.8	5.0	9.0	23
	90	0.27	0.97	2.7	5.3	9.1	20
10	10	0.79	2.3	7.5	22	42	57
	20	0.58	1.2	3.3	11	36	92

Tabla 5.7. Coeficiente de atenuación del aire.

#### 5.3.6.5. Materiales asignados

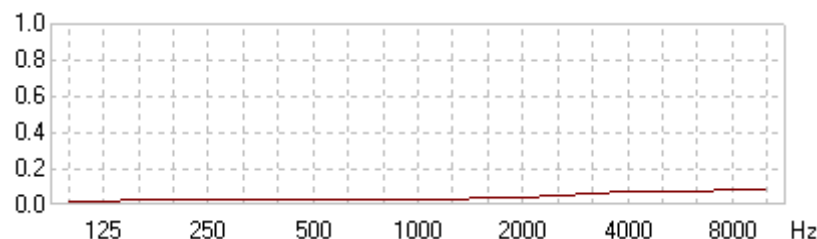
A continuación, se describe la asignación de materiales tras los cambios realizados en el ajuste.

Tanto al suelo de la pista como al suelo de las pistas de squash se le asignó el material *LINOLEUM*. Este material se utilizó también a las cortinas divisorias, ya que fue asignado inicialmente y los resultados en los puntos cercanos a éstas coincidían con los valores ‘in situ’.

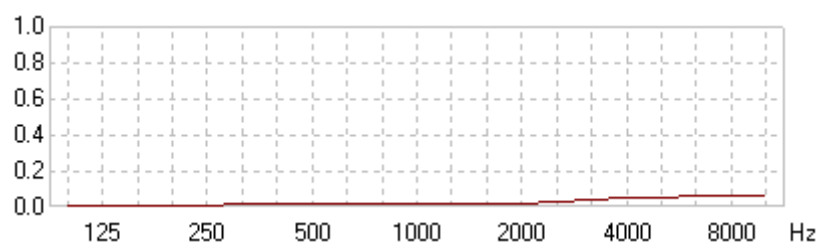


*Figura 5.27. Coeficientes de absorción de LINOLEUM.*

A las paredes de hormigón se les asignó el material CONCRETE R y el material CONCRETE S, dependiendo de las zonas, ya que eran ligeramente diferentes.

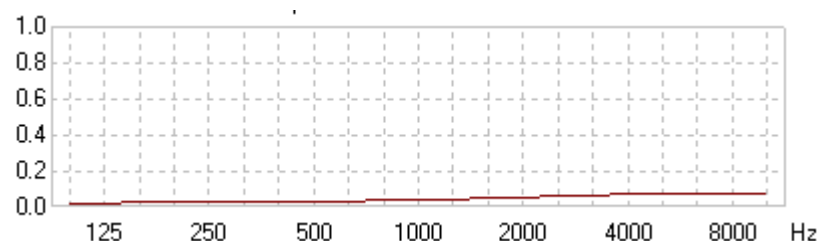


*Figura 5.28. Coeficientes de absorción de CONCRETE R.*



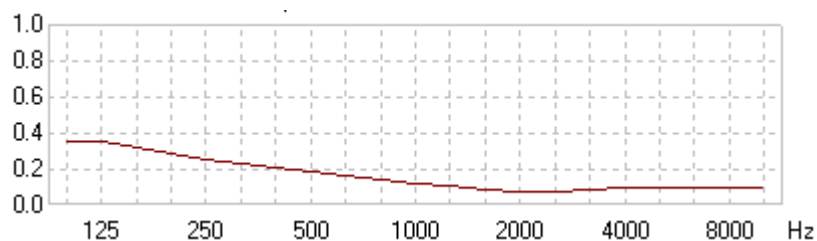
*Figura 5.29. Coeficientes de absorción de CONCRETE S.*

Las paredes de ladrillo se modelaron con el material CCLY BRICK.



*Figura 5.30. Coeficientes de absorción de CCLY BRICK.*

A las ventanas que dan al exterior se les asignó el material WIND GLASS.



*Figura 5.31. Coeficientes de absorción de WIND GLASS.*

A las ventanas de debajo de las gradas se les asignó el material WINDOW DP.

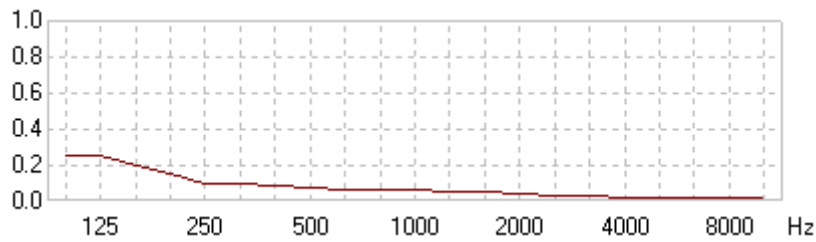


Figura 5.32. Coeficientes de absorción de WINDOW DP.

Las canastas y el saliente de la grada fueron modeladas con un material con coeficiente de absorción de 0.1 para todas las frecuencias. Se utilizó este material debido al desconocimiento de los coeficientes de absorción de los materiales de esos elementos y su carácter reflectante.

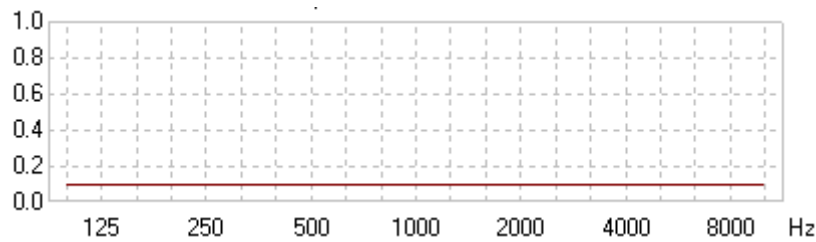


Figura 5.33. Coeficientes de absorción de  $a=10\%$ .

Para el suelo de las gradas se utilizó el material TILE,FLOOR.

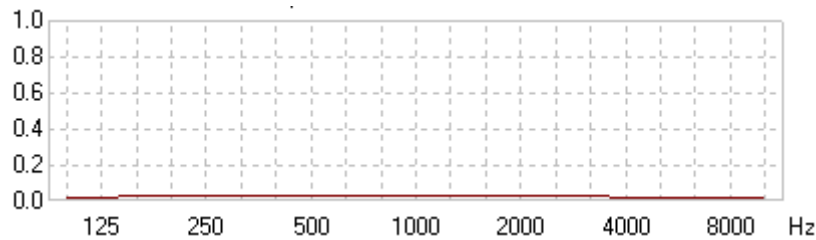


Figura 5.34. Coeficientes de absorción de TILE,FLOOR.

A las tuberías del techo se les asignó el material STEEL.

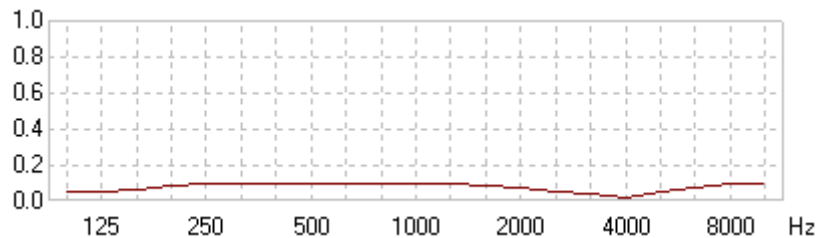


Figura 5.35. Coeficientes de absorción de STEEL.

Los huecos fueron modelados con un material con coeficiente de absorción de 0.5 para todas las frecuencias.

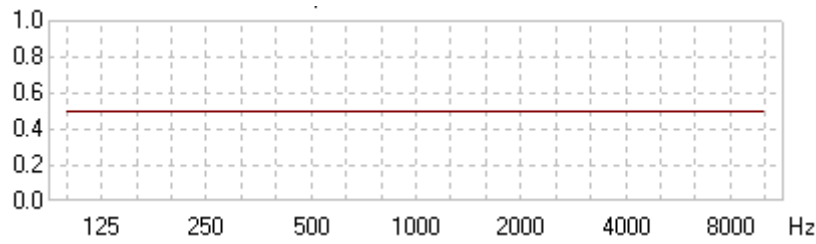


Figura 5.36. Coeficientes de absorción de  $\alpha=50\%$ .

Las espalderas se modelaron con el material WOODFLR LN.

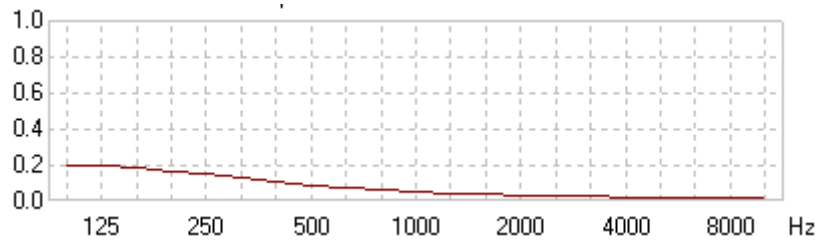


Figura 5.37. Coeficientes de absorción de WOODFLR LN.

Para los bancos de las gradas se editó un material específico absorbente a bajas frecuencias para ajustar los valores obtenidos en las gradas.

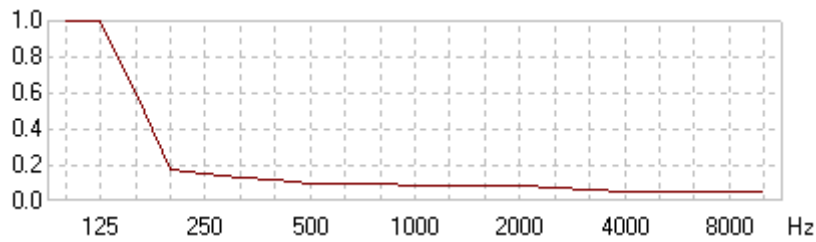


Figura 5.38. Coeficientes de absorción del material utilizado en los bancos de las gradas.

En el techo fue necesario también editar un material debido a su influencia en todas las medidas.

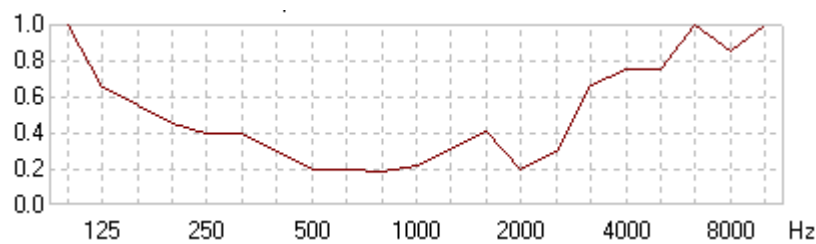
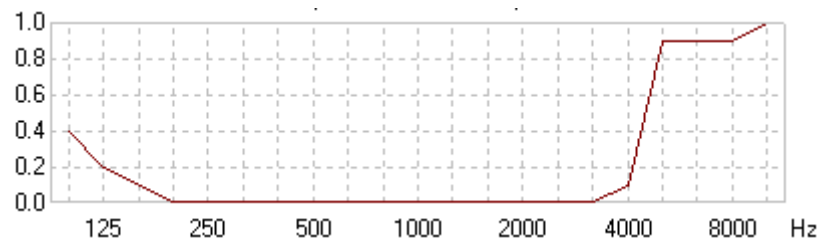


Figura 5.39. Coeficientes de absorción del material utilizado en el techo de la pista y de las pistas de squash.

Por último, para las paredes de las pistas de squash se editó un material específico tras comprobar su influencia en los valores obtenidos.



*Figura 5.40. Coeficientes de absorción del material utilizado en las pistas de squash.*

Posición	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1.25 Hz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz	6.3 kHz	8 kHz	10 kHz
1	66.1	74.85	81.83	83.29	82.33	83.2	81.56	80.98	79.65	78.81	77.06	74.61	77.83	76	74.55	72.86	69.43	67.24	65.07	55.63	45.41
2	70.58	73.24	79.23	81.09	82.67	82.56	82.22	80.11	79.92	79.19	76.04	75.08	78.21	75.41	74.68	72.39	69.82	67.66	65.42	56.6	45.41
3	71.86	74.39	80.59	82.86	81.35	83.61	81.9	81.02	80.09	79.4	76.99	75.05	78.19	76.44	75.75	74.41	71.1	68.3	66.58	57.35	46.93
4	72.98	74.87	81.24	82.64	82.53	85.06	82.07	81.01	79.68	79.35	77.55	75.58	78.42	76.9	76.51	74.89	71.04	68.65	66.55	58.31	48.31
5	71.47	75.75	78.88	81.35	82.1	85.67	81.86	81	80.07	79.83	77.3	76.83	79.77	78.49	77.34	75.08	72.32	70.46	68.06	59.27	49.89
6	74.47	75.4	78.91	83.26	81.68	84.34	81.72	81.54	80.38	79.17	76.9	75.56	78.4	76.46	76.38	73.92	70.69	69.54	67.26	58.53	46.82
7	70.45	73.76	80.32	80.36	81.24	81.36	82.32	80.23	79.39	78.38	76.65	74.26	77.28	76.02	74.88	72.94	70.19	68.17	64.81	56.43	44.85
8	73.5	73.82	82.1	80.82	82.4	84.68	81.79	81.27	81.31	79.59	76.47	74.62	77.84	75.82	75.08	73.54	70.37	67.97	65.42	56.46	45.34
9	70.23	77.1	80.55	83.28	82.42	84.14	83.33	82.56	80.79	80.51	76.83	76.36	78.88	76.13	76.31	74.54	71.5	69.45	68.11	58.37	48.36
10	72.26	78.31	82.44	80.66	82.75	84.13	82.84	80.84	79.57	79.43	77.1	75.08	78.41	76.32	76.14	74.33	71.35	68.67	66.19	57.41	46.61
11	73.29	78.13	81.98	81.67	84.16	83.13	84.05	81.92	80.23	79.75	77.21	75.62	78.39	76.54	77.13	75.28	71.58	68.65	66.01	57.62	47.16
12	72.87	78.33	81.43	82.3	82.24	83.41	83.39	82.08	80.22	79.93	77.49	75.79	78.43	76.53	76.59	74.28	71.52	67.99	65.47	56.13	44.88
13	71.79	76.65	79.83	81.04	82.67	82.87	82.15	80.68	80.34	78.05	76.64	75.55	78.27	75.35	75.11	73.62	70.67	67.73	65.79	56.28	45.26
14	72.27	76.42	80.32	80.99	81.68	80.72	82	80.63	80.34	79.11	76.76	73.96	77.96	75.39	74.56	72.49	69.97	67.16	64.38	55.24	44.03
15	69.37	75.14	80.52	83.6	82.46	83.08	81.05	81.05	80.56	79.06	76.22	74.47	77.6	74.99	74.36	72.77	69.8	67.59	64.47	56.1	44.82
16	71.03	76.34	79.93	82.09	82.75	84.15	82.32	81.12	80.32	79.65	76.6	74.82	78.41	75.86	74.94	73.26	70.38	68.16	65.59	56.29	45.56
17	71.19	76.92	81.21	82.14	84.01	83.61	82.53	81.7	80.74	79.88	77.33	75.28	79.29	76.38	75.87	74.04	71.47	69.37	67.24	58.7	48.97
18	73.75	76.6	81.48	81.79	82.95	83.28	83.04	81.59	80.55	79.94	77.31	76.17	80.83	78.98	78.35	76.82	73.96	71.14	69.97	61.91	53.94
19	71.85	76.11	80.12	81.28	83.83	83.1	82.28	81.12	80.67	80.01	77.29	75.4	78.25	76.25	76.06	74.39	71.36	69.4	66.71	58.2	47.1
20	68.94	75.76	79.96	82.79	81.87	84.1	82.88	81.07	79.95	79.53	76.29	74.66	77.86	75.73	74.85	73.05	69.99	67.53	65.16	56.93	45.87
21	71.13	73.58	79.72	80.17	80.74	80.97	79.95	78.75	78.33	77.43	74.75	72.83	76.39	74.08	72.93	71.56	68.51	66.52	63.25	55.34	43.3
22	67.02	71.06	82.23	84.99	79.8	82.9	81.06	78.77	79.08	77.71	75.42	73.13	76.27	74.13	73.16	71.36	67.92	67.45	64.16	56.26	45.26
23	72.9	77.6	83.91	83.65	82.14	82.95	82.3	81.18	79.62	79.9	76.89	75.36	78.16	76.44	75.91	72.78	70.13	68	66.16	57.75	46.96
24	72.33	78.65	84.08	83.38	83.66	84.24	81.08	81.23	81.14	79.35	76.77	75.69	79.98	77.1	75.56	74.62	71.38	70.85	67.12	59.55	50.24
25	72.98	80.35	82.99	84.35	83.22	84.21	81.99	80.47	80.44	79.27	77.67	76.3	79.39	76.42	77.47	74.26	73.13	70.81	67.63	61.1	52.79
26	73.43	79.55	83.95	81.63	83.21	83.69	80.35	79.93	80.07	79.24	76	74.83	77.68	75.55	76	73.48	70.15	68.53	67.58	58.67	47.74
27	78.32	83.06	83.47	83.22	83.46	84.1	82.58	81.27	80.74	79.98	77.47	74.89	77.42	76.4	75.73	75.17	71.64	68.9	66.67	58.49	48.37
28	77.11	78.11	84.59	82.78	84.75	83.25	81.96	81.54	80.7	79.65	78.04	76.77	79.73	77.03	76.43	75.15	71.19	70.28	68.24	62.01	51.2
29	74.21	80.52	83.98	82.03	83.98	84.27	82.38	81.05	80.13	78.86	76.88	76.15	78.63	77.02	76.41	74.46	71.37	69.93	66.62	58.92	49.14
30	73.17	79.61	84.19	83.06	82.22	84.14	81.72	81.28	80.85	79.61	76.67	75.52	78.18	75.96	76.11	74.1	70.81	69.09	65.99	58.75	47.62
31	72.46	76.98	83.04	84.27	81.57	83.18	82.54	80.64	78.87	75.79	74.33	77.96	75.66	74.59	72.79	70.05	68.39	66.05	57.65	46.62	
32	72.7	75.21	81.83	83.43	81.27	82.79	81.64	79.87	80.09	78.92	75.34	74.42	77.33	75.45	74.2	71.99	68.86	68.21	66.3	57.26	46.27
33	76.15	79.09	78.47	82.77	81.48	82.97	81.63	80.27	79.61	78.72	76.22	74.41	77.21	76.11	75.16	72.81	70.21	69.3	66.64	57.86	47.27
34	71.06	77.76	81.53	83.48	82.25	83.28	81.57	81.02	81.12	79.32	77	75.14	78.47	77.04	76.5	73.93	71.78	69.27	66.86	57.7	48.12
35	76.08	81.03	84.51	84.38	84.29	84.51	83.16	82.37	81.99	80.75	77.35	77.14	79.74	76.5	77.54	75.5	73.2	70.79	68.19	60.06	51
36	77.68	80.65	83.64	84.98	86.98	84.17	83.48	82.9	84.02	82.93	78.26	77.44	79.42	79.8	79.02	76.16	73.43	72.72	69.98	64.35	53.34
37	78.31	81.77	85.04	85.62	86.35	83.57	83.29	83.31	83.8	82.23	77.92	77.35	79.01	77.81	75.99	74.92	71.44	72.05	72.04	62.25	54.61
38	74.09	77.87	83.63	84.31	84.41	83.8	82.2	82.22	81.42	80.41	77.39	75.37	77.61	76.47	75.63	73.99	70.24	68.85	66.33	59.06	48.89
39	71.99	74.95	84.35	84.57	81.14	82.73	82.05	80.7	80.33	79.02	76.18	74.15	77.67	76.01	75.17	72.6	68.85	67.87	64.95	56.37	45.43
40	69.85	77.83	86.3	86.14	83.23	84.56	81.68	80.44	80.52	79.13	76.18	74.82	77.15	76.13	74.79	72.59	68.99	67.17	65.59	55.31	43.84
41	72.87	77.97	82.33	84.65	83.86	82.13	81.23	80.69	79.79	76.97	75.6	78.74	76.66	74.81	73.48	69.22	68.83	66.04	58.01	46.17	
42	78.59	81.95	84.5	84.55	84.98	82.95	82.13	83.49	83.67	82.55	77.84	77.72	78.87	78.67	79.09	76.32	72.62	71.56	69.13	62.06	50.86
43	77.92	80.52	84.5	83.92	84.65	83.2	82.13	83.37	83.78	82.53	77.92	77.73	79.64	80.79	78.59	77.72	74.55	72.85	71.54	66.01	53.98
44	72.7	76.98	81.59	83.47	84.33	83.84	82.39	81.67	81.16	80.01	77.24	75.54	78.42	76.74	75.44	74.23	70.01	69.24	66.81	59.25	48.82
45	68.61	72.93	79.78	81.99	80.59	82.96	82.11	80.6	79.93	78.9	75.94	74.43	77.14	74.98	74.04	71.98	68.15	67.6	64.36	59.98	47.79
46	74.42	78.64	83	82.96	83.54	84.23	80.99	81.62	79.76	78.81	76.56	75.31	78.52	76.85	75.23	74.32	70.79	69.99	68.71	60.47	50.72
47	74.27	80.26	83.76	83.92	83.96	83.08	81.12	81.72	81.19	81.16	78.82	76.59	79.27	78.5	76.95	76.14	72.69	71.83	68.96	62.07	50.14
48	72.66	80.08	85.25	82.52	84.91	82.37	81.51	80.49	80.43	79.2	77.39	76.8	78.06	77.02	75.95	74.7	71.23	70.27	67.66	60.52	52.01
49	73.51	79.01	82.79	83.32	81.73	83.66	81.39	80.69	79.49	78.73	76.2	75.74	77.41	75.68	76.21	74.6	69.47	68.23	66.16	59.62	47.26
50	70.28	74.63	80.52	81.73	82.62	81.75	81.46	79.99	80.5	79.1	76.02	74.14	76.73	75.19	73.73	72.39	68.83	67.32	65.36	57.52	45.93
51	72.16	77.91	82.71	82.95	83.87	82.85	81.82	80.56	79.99	79.32	77.31	75.29	78.41	76.5	75.61	74.39	71.38	69.5	68.28	59.38	48.17
52	72.42	79.3	80.98	83.56	83.22	83.11	81.49	80.13	80.35	79.85	75.48	74.81	78.7	76.02	75.64	73.6	70.77	69.62	67.37	58.78	48.28
53	74.85	77.87	82.19	82.12	83.21	83.95	81.54	81.03	79.83	78.12	76.58	75.36	77.52	75.48	76.05	73.49	70.28	68.41	67.08	58.95	47.25
54	77.15	76.51	83.42	83.77	83.92	82.48	82.21	80.7	81.17	80.55	78.18	76.26	78.79	77.15	76.44	74.57	71.76	70.2	68.3	59.57	49.44
55	75.57	79.42	84.94	83.75	83.32	84.04	82.31	80.32	80.27	78.35	76.55	75.08	78.01	75.35	75.61	74.35	70.62	68.12	66.09	57.01	45.58
56	74.87	78.83	83.43	84.01	84.33	83.8	82.26	80.81	80.66												

Posición	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1 kHz	1.25 kHz	1.6 kHz	2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4 kHz	5 kHz	6.3 kHz	8 kHz	10 kHz
1	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2.1	2	2.1	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
19	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	2.1	2	2	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	2	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
25	2.1	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
26	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	2	2	2	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
30	2	2	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
31	2	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.1
32	2.1	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
33	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
34	2.1	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
35	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
36	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
37	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
38	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
39	2	2	2	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
40	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
41	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
42	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
43	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
44	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
45	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
46	2.1	2.1	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
47	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
48	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3
49	2.1	2	2	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
50	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
51	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
52	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
53	2	2	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
54	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
55	2.1	2.1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
56	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla 5.5. Valores de incertidumbre expandida obtenidos para las medidas 'in situ'.



Posición	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz	6.3kHz	8kHz	10kHz
1	72.1	76.7	81.5	82.7	82.9	81.7	81.2	80.6	79.9	78.9	76.2	75.4	78.4	76	74.9	73.2	68.7	68.1	67.7	58.6	51.7
1 in situ	66.1	74.9	81.8	83.3	82.3	83.2	81.6	81	79.7	78.8	77.1	74.6	77.8	76	74.6	72.9	69.4	67.2	65.1	55.6	45.4
2	71.8	76.4	81.3	82.5	82.8	81.6	81.1	80.5	79.8	78.9	76.2	75.4	78.2	75.9	74.8	73	68.5	67.8	67.3	58.3	51.4
2 in situ	70.5	73.2	78.2	80.1	82.2	81.6	81.3	80.6	79.9	79.2	76	75.1	78.2	75.4	74.7	72.4	69.8	67.7	65.4	56.6	45.4
3	72.4	76.9	81.7	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.5	76.1	75	73.3	68.9	68.4	68.1	59	52.1
3 in situ	71.9	74.4	80.6	82.9	81.4	83.6	81.9	81	80.1	79.4	77	75.1	78.2	76.4	75.8	74.4	71.1	68.3	66.6	57.4	46.9
4	72.5	76.9	81.7	82.8	83	81.9	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.6	78.5	76.1	75.1	73.4	69	68.5	68.2	59.1	52.3
4 in situ	73	74.9	81.2	82.6	82.5	85.1	82.1	81	79.7	79.4	77.6	75.6	78.4	76.9	76.5	74.9	71	68.7	66.6	58.3	48.3
5	72.5	76.9	81.7	82.8	83	81.9	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.6	78.5	76.1	75.1	73.4	69	68.5	68.2	59.1	52.2
5 in situ	71.5	75.8	78.9	81.4	82.1	85.7	81.9	81	80.1	79.8	77.3	76.8	79.8	78.5	77.3	75.1	72.3	70.5	68.1	59.3	49.9
6	72.4	76.8	81.6	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.3	68.9	68.4	68	58.9	52.1
6 in situ	74.5	75.4	78.9	83.3	81.7	84.3	81.7	81.5	80.4	79.2	76.9	75.6	78.4	76.5	76.4	73.9	70.7	69.5	67.3	58.5	46.8
7	72.3	76.8	81.6	82.7	82.9	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.2	68.8	68.2	67.9	58.8	51.9
7 in situ	70.5	73.8	80.3	80.4	81.2	81.4	82.3	80.2	79.4	78.4	76.7	74.3	77.3	76	74.9	72.9	70.2	68.2	64.8	56.4	44.9
8	72.2	76.8	81.6	82.7	82.9	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.2	68.8	68.2	67.8	58.8	51.9
8 in situ	73.5	73.8	82.1	80.8	82.4	84.7	81.8	81.3	81.3	79.6	76.5	74.6	77.8	75.8	75.1	73.5	70.4	68	65.4	56.5	45.3
9	72.4	76.9	81.7	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.5	76.1	75	73.3	68.9	68.4	68.1	59	52.1
9 in situ	70.2	77.1	80.6	83.3	82.4	84.1	82.3	82.6	80.8	80.5	76.8	76.4	78.9	76.1	76.3	74.5	71.5	69.5	68.1	58.4	48.4
10	72.7	77	81.8	82.9	83.1	81.9	81.4	80.7	80	79.1	76.4	75.6	78.6	76.2	75.1	73.5	69.1	68.7	68.4	59.3	52.5
10 in situ	72.3	78.3	82.4	80.7	82.8	84.1	82.8	80.8	79.6	79.4	77.1	75.1	78.4	76.3	76.1	74.3	71.4	68.7	66.2	57.4	46.6
11	73.1	77.3	82	83.1	83.2	82.1	81.5	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.7	76.3	75.3	73.8	69.4	69.1	68.7	59.9	53.2
11 in situ	73.3	78.1	82	81.7	84.2	83.1	84.1	81.9	80.2	79.8	77.2	75.6	78.4	76.5	77.1	75.3	71.6	68.7	66	57.6	47.2
12	72.6	76.9	81.7	82.8	83	81.9	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.6	78.5	76.1	75.1	73.4	69	68.5	68.3	59.2	52.3
12 in situ	72.9	78.3	81.4	82.3	82.2	83.4	83.4	82.1	80.2	79.9	77.5	75.8	78.4	76.5	76.6	74.3	71.5	68	65.5	56.1	44.9
13	72.3	76.8	81.6	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.3	68.9	68.3	68	58.9	52
13 in situ	71.8	76.7	79.8	81	82.7	82.9	82.2	80.7	80.3	78.1	76.6	75.6	78.3	75.4	75.1	73.6	70.7	67.7	65.8	56.3	45.3
14	72.2	76.8	81.6	82.7	82.9	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.2	68.8	68.2	67.8	58.8	51.9
14 in situ	72.3	76.4	80.3	81	81.7	80.7	82	80.6	80.3	79.1	76.8	74	78	75.4	74.6	72.5	70	67.2	64.4	55.2	44
15	71.8	76.4	81.3	82.5	82.8	81.6	81.1	80.5	79.8	78.9	76.2	75.4	78.2	75.9	74.8	73	68.5	67.8	67.3	58.3	51.4
15 in situ	69.4	75.1	80.5	83.6	82.5	83.1	81.1	81.1	80.6	79.1	76.2	74.5	77.6	75	74.4	72.8	69.8	67.6	64.5	56.1	44.8
16	72.4	76.8	81.6	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.3	68.9	68.4	68	58.9	52.1
16 in situ	71	76.3	79.9	82.1	82.8	84.2	82.3	81.1	80.3	79.7	76.6	74.8	78.4	75.9	74.9	73.3	70.4	68.2	65.6	56.3	45.6
17	73.2	77.4	82.1	83.1	83.3	82.1	81.5	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.7	76.3	75.3	73.8	69.5	69.1	68.8	59.9	53.3
17 in situ	71.2	76.9	81.2	82.1	84	83.6	82.5	81.7	80.7	79.9	77.3	75.3	78.3	76.4	75.9	74	71.5	69.4	67.2	58.7	49
18	73.5	77.6	82.2	83.2	83.4	82.2	81.6	80.9	80.2	79.2	76.6	75.9	78.8	76.3	75.4	73.9	69.7	69.5	69.4	60.3	53.9
18 in situ	73.8	76.6	81.5	81.8	83	83.3	83	81.6	80.6	79.9	77.3	76.2	80.8	79	78.4	76.8	74	71.1	70	61.9	53.9
19	72.5	76.9	81.7	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.6	78.5	76.1	75	73.4	69	68.4	68.1	59	52.2
19 in situ	71.9	76.1	80.1	81.3	83.8	83.1	82.3	81.1	80.7	80	77.3	75.4	78.3	76.3	76.1	74.4	71.4	69.4	66.7	58.2	47.1
20	72.8	77.1	81.8	82.9	83.1	81.9	81.4	80.7	80	79.1	76.4	75.6	78.6	76.2	75.1	73.5	69.2	68.7	68.5	59.4	52.6
20 in situ	68.9	75.8	80	82.8	81.9	84.1	82.9	81.1	80	79.5	76.3	74.7	77.9	75.7	74.9	73.1	70	67.5	65.2	56.9	45.9
21	73.2	77.4	82.1	83.1	83.3	82.1	81.5	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.8	76.3	75.3	73.8	69.5	69.2	69.1	60	53.3
21 in situ	71.1	73.6	79.7	80.2	80.7	81	80	78.8	78.3	77.4	74.8	72.8	76.4	74.1	72.9	71.6	68.5	66.5	63.3	55.3	43.3
22	73.3	77.4	82.1	83.1	83.3	82.2	81.6	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.8	76.3	75.3	73.8	69.5	69.3	69.2	60.1	53.4
22 in situ	67	71.1	82.2	85	79.8	82.9	81.1	78.8	79.1	77.7	75.4	73.1	76.3	74.1	73.2	71.4	67.9	67.5	64.2	56.3	45.3
23	73.6	77.6	82.3	83.3	83.4	82.3	81.7	80.9	80.2	79.3	76.6	75.9	78.9	76.4	75.4	74	69.8	69.6	69.6	60.5	53.9
23 in situ	72.9	77.6	83.9	83.7	82.1	83	82.3	81.2	79.6	79.9	76.9	75.4	78.2	76.4	75.9	72.8	70.1	68	66.2	57.8	47
24	73.2	77.4	82.1	83.1	83.3	82.1	81.5	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.7	76.3	75.3	73.8	69.5	69.1	68.8	59.9	53.3
24 in situ	72.3	78.7	84.1	83.4	83.7	84.2	81.1	81.2	81.1	79.4	76.8	75.7	80	77.1	75.6	74.6	71.4	70.9	67.1	59.6	50.2
25	72.8	76.9	81.7	82.8	83	81.9	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.6	78.5	76.1	75.1	73.4	69	68.5	68.2	59.1	52.3
25 in situ	73	80.4	83	84.4	83.2	84.2	82	80.5	80.4	79.3	77.7	76.3	79.4	76.4	77.5	74.3	73.1	70.8	67.6	61.1	52.8
26	73.2	77.3	82	83.1	83.3	82.1	81.5	80.8	80.1	79.2	76.5	75.8	78.7	76.3	75.3	73.8	69.5	69.2	69.1	59.9	53.2
26 in situ	73.4	79.6	84	81.6	83.2	83.7	80.4	79.9	80.1	79.2	76	74.8	77.7	75.6	76	73.5	70.2	68.5	67.6	58.7	47.7
27	73.6	77.6	82.3	83.3	83.4	82.3	81.6	80.9	80.2	79.3	76.6	75.9	78.9	76.4	75.4	74	69.8	69.6	69.6	60.4	53.8
27 in situ	78.3	83.1	83.5	83.2	83.5	84.1	82.6	81.3	80.7	80	77.5	74.9	77.4	76.4	75.7	75.2	71.6	68.9	66.7	58.5	48.4
28	73	77.2	81.9	83	83.2	82	81.5	80.7	80.1	79.1	76.4	75.7	78.7	76.2	75.2	73.7	69.3	69	68.8	59.7	53
28 in situ	77.1	78.1	84.6	82.8	84.8	83.3	82	81.5	80.7	79.7	78	76.8	79.7	77	76.4	75.2	71.2	70.3	68.2	62	51.2
29	72.3	76.8	81.6	82.7	82.9	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.3	68.9	68.3	67.9	58.8	52
29 in situ	74.2	80.5	84	82	84	84.3	82.4	81.1	80.1	78.9	76.9	76.2	78.6	77	76.4	74.5	71.4	69.9	66.6	58.9	49.1
30	72.3	76.8	81.6	82.8	83	81.8	81.3	80.6	79.9	79	76.3	75.5	78.4	76.1	75	73.3	68.9	68.3	68	58.9	52
30 in situ	73.2	79.6	84.2	83.1	82.2	84.1	81.7	81.3	80.9	79.6	76.7	75.5	78.2	76	76.1	74.1	70.8	69.1	66	58.8	47.6
31	72.5	76.4	81.5	82.6	82.8	81.6	81.1	80.5	79.8	78.9	76.2	75.4	78.2	75.9	74.8	73	68.5	67.8	67.3	58.3	51.4
31 in situ	72.5	77	83	84.3	83.4	83.2	82.5	80.6	80.6	78.9	75.8	74.3									

## 6. Propuesta y simulación de refuerzo sonoro con EASE Focus

### 6.1. Sistema de refuerzo sonoro elegido

El sistema de refuerzo elegido para la sonorización del polideportivo Ignacio Pinedo fue un sistema distribuido, ya que es el más apropiado dada la disposición de las gradas y la versatilidad de la pista central, que tiene la capacidad de albergar diferentes tipos de competiciones y actividades deportivas.

El diseño de la sonorización se ha dividido en dos partes, atendiendo por separado a las necesidades tanto de la parte de las gradas como de la pista central.

El software utilizado para realizar el diseño ha sido EASE Focus, con el fin de exportar después a EASE las configuraciones diseñadas y comprobar su comportamiento dentro del recinto. EASE Focus sólo permite obtener niveles de SPL directo y relación señal/ruido, pero tiene la ventaja de ser una herramienta que proporciona muchas facilidades para diseñar refuerzos sonoros. Los parámetros en los que influye el recinto (SPL total, %ALCons y STI) fueron obtenidos en EASE una vez insertado el refuerzo diseñado con EASE Focus.

Cabe destacar que este capítulo trata sobre una propuesta teórica de refuerzo sonoro. Para llevar a cabo en la realidad la propuesta adoptada sería necesario instalar más elementos a parte de los propios altavoces, como amplificadores, procesadores de señal, mesa de mezclas, cableado, reproductores de música, micrófonos, etc. Esta parte se ha obviado por quedar fuera del alcance de este trabajo.

#### 6.1.1. Refuerzo sonoro para las gradas

Para la zona de gradas se han tenido en cuenta dos objetivos a cumplir:

- Cobertura uniforme
- Buena relación señal/ruido

En las gradas se va a escuchar tanto música (en exhibiciones de gimnasia rítmica, animación en partidos de baloncesto, fútbol sala y voleibol...) como voz (presentación de alineaciones, animación, sistemas de aviso, etc.), por lo que es necesaria una cobertura uniforme de toda la zona del graderío. El objetivo que se impuso antes de empezar el diseño fue lograr una cobertura que garantice una diferencia menor a  $\pm 3$  dB en las bandas de octava de 500 Hz a 2 kHz.

Por otra parte, es importante garantizar una correcta inteligibilidad, no sólo para los mensajes hablados por parte del *speaker* en las competiciones deportivas, sino también para señales y avisos de emergencia. Por ello es importante obtener una buena relación ruido. El objetivo impuesto fue lograr una relación señal/ruido de por lo menos 25 dB en las bandas de octava entre 500 Hz y 4 kHz.

### **6.1.2. Refuerzo sonoro para la pista**

En la zona de pista hay que diferenciar los objetivos a cumplir dependiendo de las diferentes competiciones que puede albergar, así como sus diferentes configuraciones.

#### **6.1.2.1. Exhibiciones de gimnasia rítmica**

Las exhibiciones de gimnasia rítmica tienen lugar en la parte central de la pista, por lo que se ha diseñado un refuerzo sonoro específico para este tipo de eventos, diferenciándolo del resto de actividades que se llevan a cabo en el recinto.

Los objetivos a lograr para este tipo de sonorización son:

- Cobertura uniforme
- Buena relación señal/ruido

En las competiciones de gimnasia rítmica es de vital importancia que las gimnastas escuchen bien la música para acompañar sus movimientos al ritmo de ésta, por lo que es necesario un refuerzo que garantice una cobertura uniforme en la zona en la que se desarrollan estas competiciones, en este caso la zona central de la pista.

Además, se impuso el objetivo de lograr una relación señal/ruido de 25 dB, con el fin de garantizar una correcta escucha de los mensajes hablados (tanto de competición como de emergencia) y para evitar que, en caso de haber ruido de fondo proveniente del público durante la competición, éste entorpezca la escucha de la música en la zona donde se llevan a cabo las exhibiciones.

#### **6.1.2.2. Divisiones laterales de la pista**

En las divisiones laterales de la pista se celebran competiciones de bádminton y voleibol, en las que tan sólo es necesario escuchar señales de voz, por lo que el objetivo impuesto fue lograr una buena relación señal/ruido que garantice una correcta inteligibilidad.

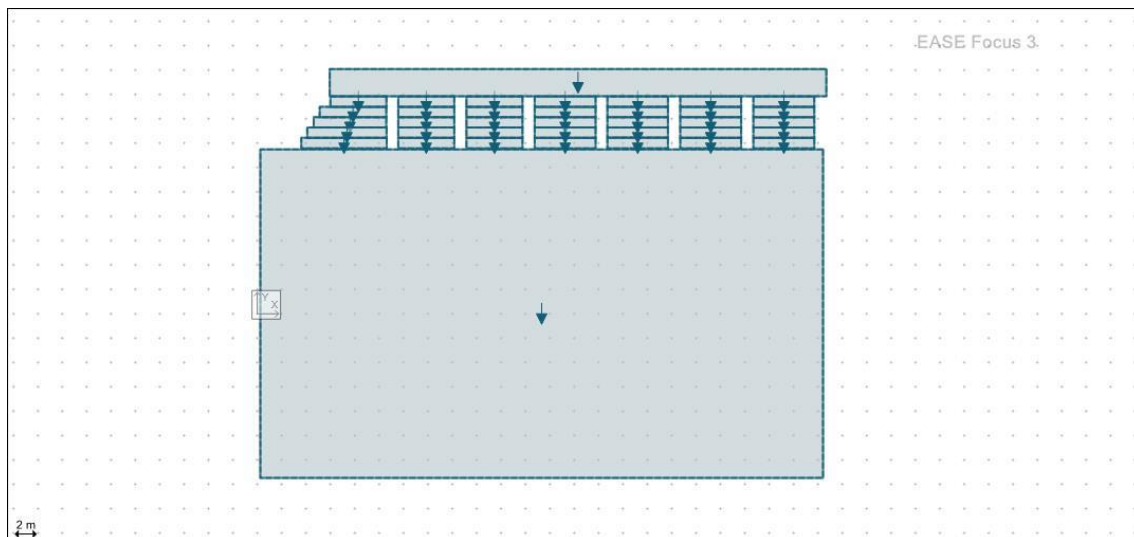
#### **6.1.2.3. Competiciones de baloncesto y fútbol sala**

Las competiciones de baloncesto y fútbol sala tienen lugar a lo largo de toda la pista, y en estos casos es suficiente con lograr una buena relación señal/ruido que garantice una correcta inteligibilidad en la escucha de mensajes hablados (relacionados con la competición o mensajes de emergencia) y de posibles señales acústicas relacionadas con la competición (final de periodo o de partido y posesión en el caso del baloncesto).

## **6.2. Creación de las zonas de audiencia**

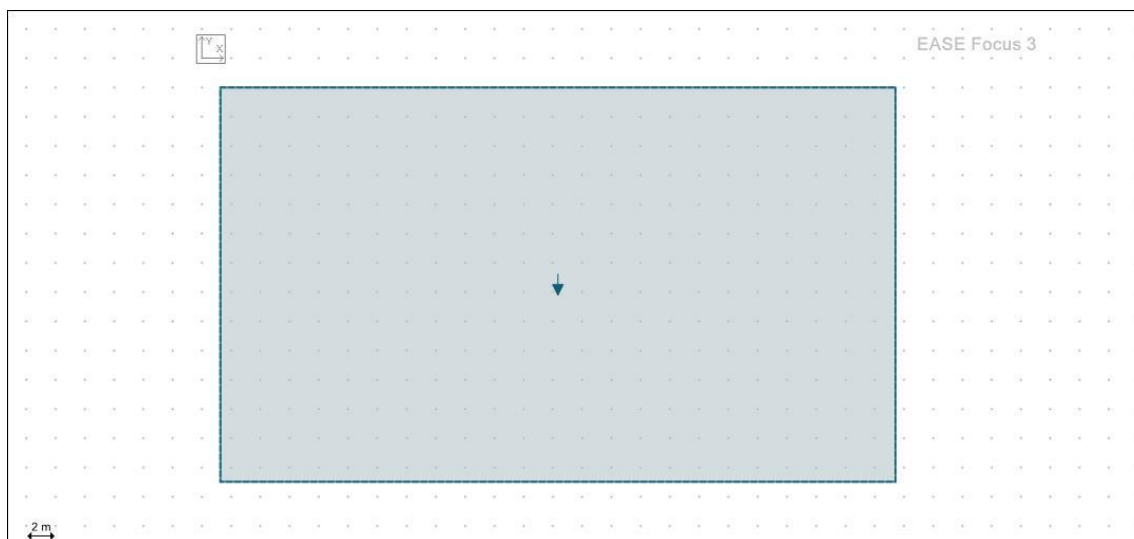
El primer paso en el diseño del refuerzo sonoro mediante EASE Focus fue crear las zonas de audiencia a sonorizar, en las que se simulan los niveles de SPL directo (sin ponderación y con ponderación A) y de relación señal/ruido.

Para ello se crearon dos grupos diferenciados de zonas de audiencia, por un lado, la pista y por otro lado las gradas.



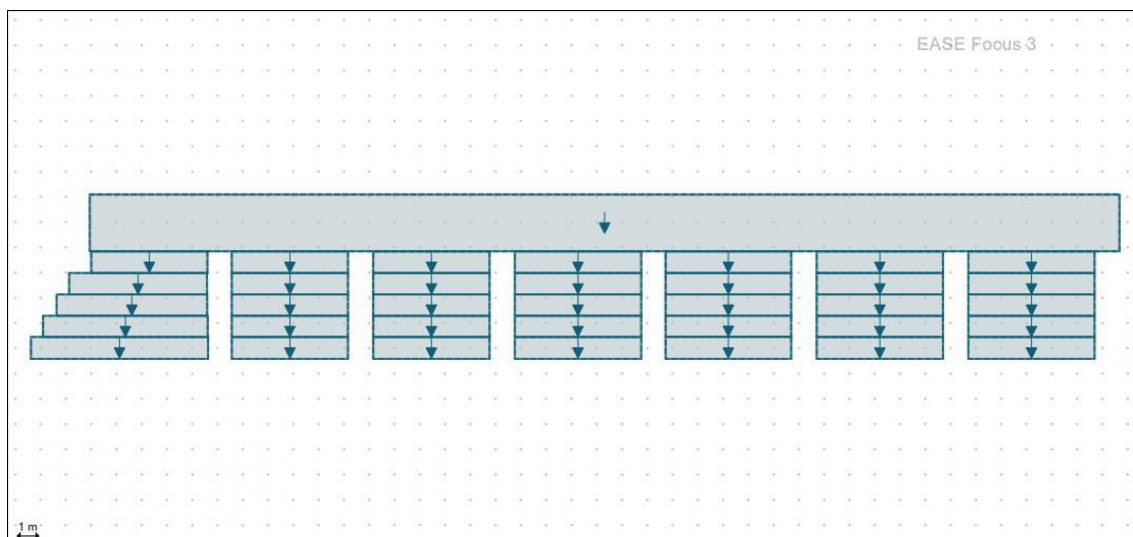
*Figura 6.1. Zonas de audiencia creadas con EASE Focus.*

La zona de pista se compone de una sola zona de audiencia que abarca las dimensiones de pista del polideportivo (46.7 m de largo y 27 m de ancho).



*Figura 6.2. Zona de pista creada con EASE Focus.*

La zona de gradas se compone de varias zonas de audiencia a diversas alturas, correspondientes a las filas de asientos. Cada grupo de zona de asientos se compone de cinco filas de asientos, y están separados uno de otro por escaleras de un metro de ancho. Las escaleras fueron representadas en el software por huecos de un metro, ya que son zonas las cuales no forman parte del objetivo de la sonorización, que se centra principalmente en las zonas en las que va a haber público sentado. Las dimensiones de cada zona de audiencia son diferentes, y se han creado acorde a las dimensiones con las que se crearon en EASE, de manera que la simulación sea lo más parecida posible en ambos softwares. Además, aunque el objetivo de la sonorización es la zona de asientos, se creó también la zona de pasillo situada encima de ésta, en la que puede haber público de pie, de manera que se puede comprobar también los niveles que proporciona el equipo en esta zona.



*Figura 6.3. Zona de las gradas creada con EASE Focus.*

## **6.3. Diseño del refuerzo sonoro**

Al igual que en el proceso de creación de las zonas de audiencia, se diseñaron por separado los refuerzos sonoros tanto para gradas como para pista, atendiendo a las necesidades de cada zona.

### **6.3.1. Diseño del refuerzo sonoro para las gradas**

Como ya se ha comentado anteriormente en el apartado 6.1.1, el objetivo a lograr en la zona de gradas era una cobertura uniforme ( $\pm 3$  dB en las bandas de octava de 500 Hz a 2 kHz) y una relación señal ruido de por lo menos 25 dB.

Para la simulación de los niveles de relación señal/ruido es necesario introducir los valores de ruido de fondo en el software. Una vez introducidos, el software considera el ruido de fondo constante para todas las zonas de audiencia del recinto.

Frente a la ausencia de datos exactos sobre los valores de ruido de fondo existentes en el recinto durante la celebración de competiciones, fue necesaria su estimación. Ésta se realizó en base a la información encontrada en diferentes artículos (citados en la bibliografía de este capítulo) que aportan valores de ruido de fondo medidos durante la celebración de competiciones en recintos. El problema es que la mayoría de estos estudios, o bien están realizados en estadios con capacidad para un gran número de espectadores o no aportan información acerca del número de espectadores o de la actividad durante la cual se han obtenido los resultados. La estimación se realizó teniendo en cuenta la capacidad del recinto (700 personas) y la variedad de actividad que se llevan a cabo en su interior, desde exhibiciones de gimnasia rítmica hasta partidos de baloncesto y fútbol sala. Los valores estimados para la simulación se muestran en la Tabla 6.1.

Frecuencia (Hz)	Nivel de ruido (dB)
31.5	45
63	45
125	45
250	55
500	60
1000	65
2000	60
4000	55
8000	35
16000	35

*Tabla 6.1. Niveles de ruido de fondo estimados para las gradas.*

Para llevar a cabo la sonorización de las gradas se optó por utilizar line arrays, ya que sus características de directividad vertical permiten dirigir la energía acústica al público, minimizando, por un lado, las posibles reflexiones que se pueden producir en el resto de superficies, y, por otro lado, la parte de la energía acústica que pueda incidir sobre la pista.

Se decidió utilizar un line array para cada grupo de zonas de audiencia, de forma que ofrezcan una cobertura uniforme y una buena relación señal/ruido para cada una de ellas.

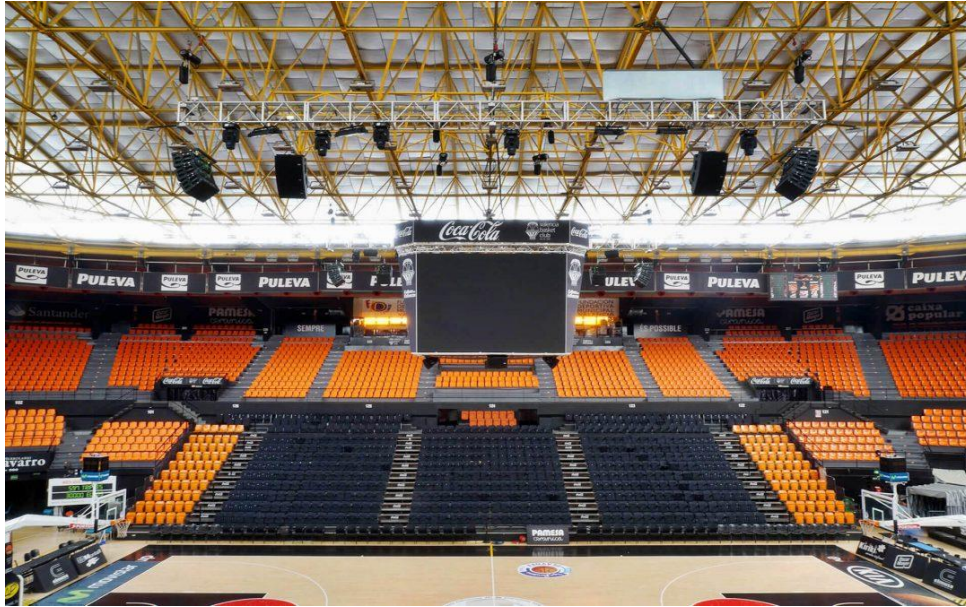
El equipo elegido en primer lugar fue un line array compuesto por cajas EL 10, pertenecientes a la serie Elite de la marca Nova.

La altura de la estructura de vigas del techo es de 8 m, por lo que se decidió buscar una altura de colocación de los arrays que pudiese ser realizable mediante la utilización de una estructura de truss acoplada a las vigas, como en el ejemplo de la Figura 6.5, y que además no perjudicase a la visibilidad para el público presente.



*Figura 6.4. Unidad del modelo EL 10 de la marca Nova.*





*Figura 6.5. Estructura de truss utilizada en la sonorización del Pabellón Fuente de San Luis, en Valencia.*

La configuración elegida para cada line array fue de tres cajas con un ángulo de  $7.5^\circ$  entre cada caja, de manera que se pudiese dar cobertura vertical a cada grupo de zonas de audiencia. Para ello se fueron probando diferentes ángulos de inclinación vertical del line array, así como diferentes alturas, partiendo de una altura inicial de 7 m.

Tras varias pruebas utilizando diferentes ángulos de inclinación vertical y diferentes alturas, se comprobó que, aunque en la mayoría de los casos se cumplían los objetivos de cobertura uniforme y relación señal/ruido para las bandas de octava de 500 Hz, 2 kHz y 4 kHz, para la banda de octava de 1 kHz había diferencias de hasta 9 dB dentro de un mismo grupo de zonas de audiencia, lo cual no cumplía con los objetivos de cobertura uniforme impuestos. Además, para lograr una relación señal/ruido de 25 dB para todos los puntos en la banda de octava de 1 kHz se obtenían niveles de presión sonora excesivos en algunos puntos de los grupos de zonas de audiencia.

Se comprobaron mediante EASE GLLViewer los diagramas polares (Figura 6.7) del line array utilizado, y se observó un estrechamiento excesivo en la cobertura horizontal para la banda de octava de 1 kHz, por lo que quedó desechada la opción de utilizar este line array, teniendo que buscar otra opción que ayudase a lograr los objetivos deseados.

En las Figuras 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se muestran los resultados obtenidos para las bandas de octava de las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz respectivamente, representando los niveles de SPL directo sin ponderación, con un ángulo de inclinación vertical de  $-7.86^\circ$  y una altura de 7 m.

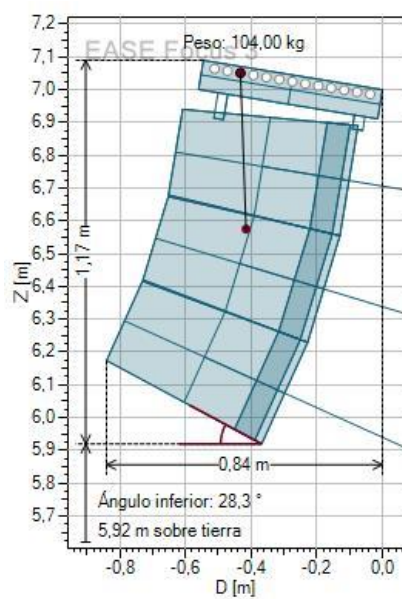


Figura 6.6. Configuración del line array compuesto por tres cajas Nova EL 10

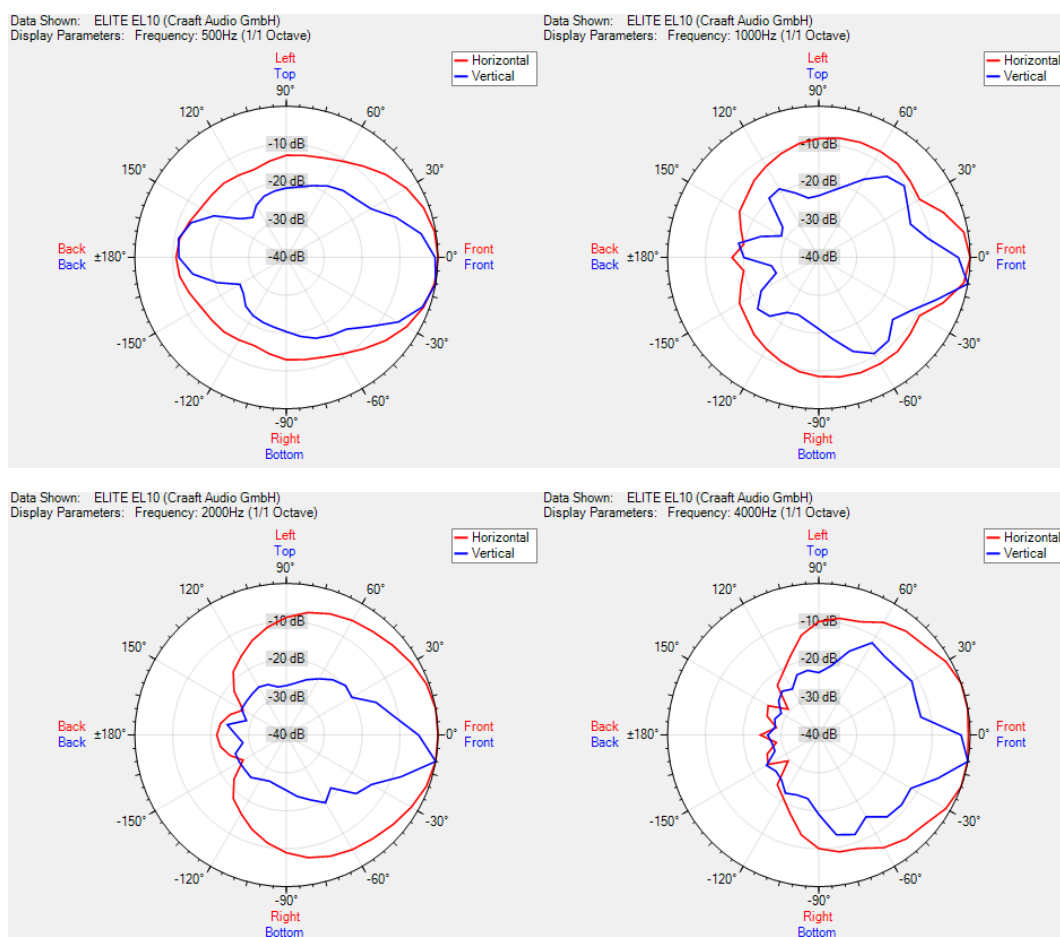


Figura 6.7. Diagramas polares del line array utilizado inicialmente compuesto por tres cajas Nova EL 10 para las frecuencias de 500 Hz (arriba a la izquierda), 1 kHz (arriba a la derecha), 2 kHz (abajo a la izquierda) y 4 kHz (abajo a la derecha).



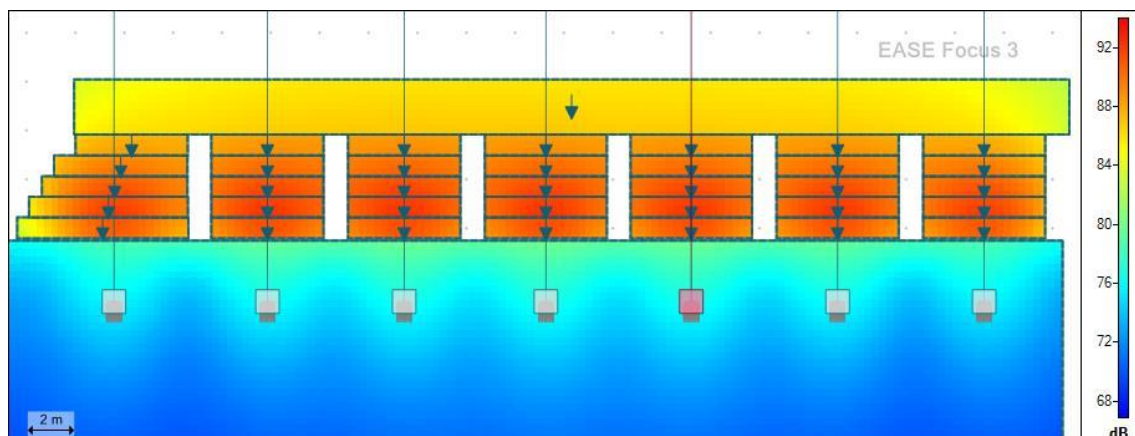


Figura 6.8. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 500 Hz.

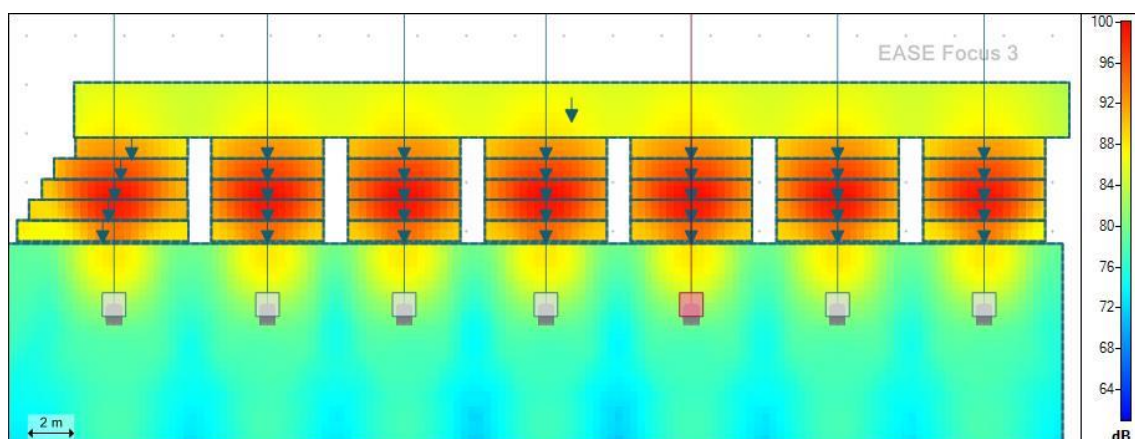


Figura 6.9. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 1 kHz.

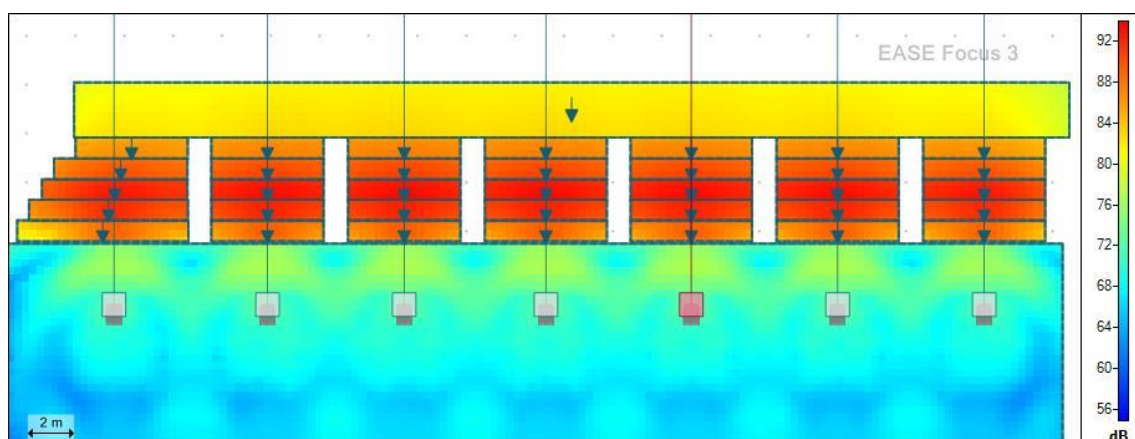


Figura 6.10. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 2 kHz.

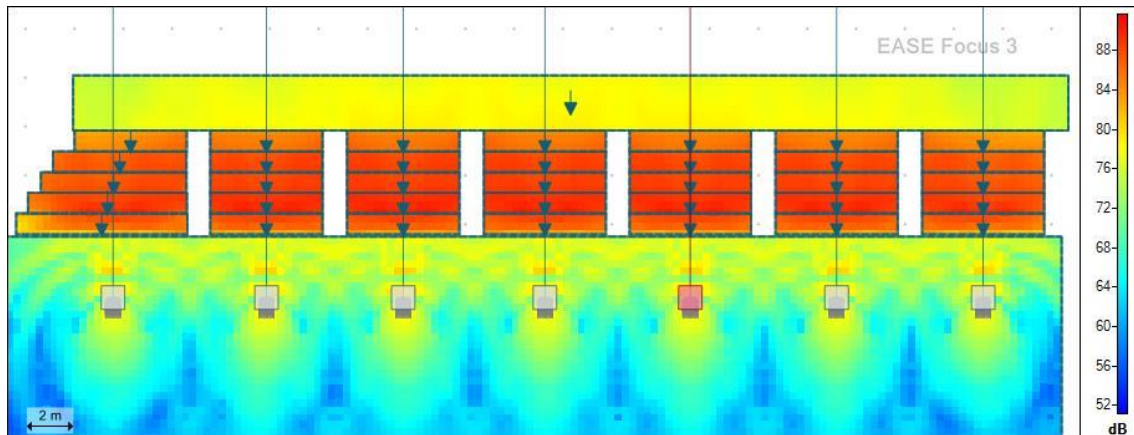


Figura 6.11. Representación del SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 4 kHz.

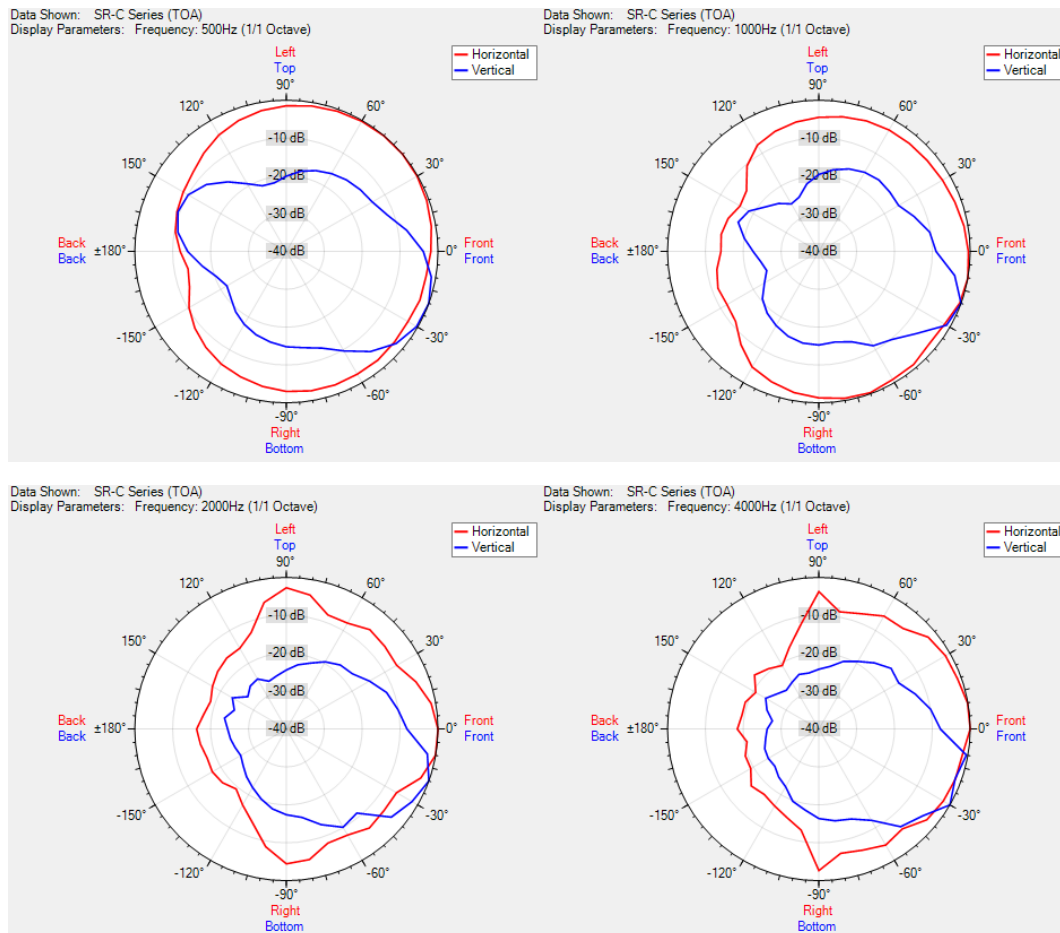
A la vista de los resultados obtenidos se optó por elegir otro tipo de line array. Se decidió utilizar un line array con cajas de la marca TOA modelo SR-C8S, ya que proporcionan una cobertura horizontal para las bandas de interés que se ajusta más a las necesidades de esta sonorización (Figura 6.13). Al igual que con el anterior modelo, se decidió utilizar un line array de tres cajas para cada grupo de zonas de audiencia.



Figura 6.12. Unidad del modelo SR-C8S de la marca TOA.

Siguiendo el mismo procedimiento que en el anterior caso, se fueron probando diferentes alturas y diferentes ángulos de inclinación con el objetivo de cumplir los requisitos de cobertura uniforme de  $\pm 3$  dB en las bandas de octava de 500 Hz a 2 kHz y una relación señal/ruido de por lo menos 25 dB. El ángulo de inclinación inicial fue de  $0^\circ$  y la altura inicial de 7.5 m. Además, se configuró el ángulo entre cada caja que compone el line array de manera que la se cubriese verticalmente cada grupo de zonas de audiencia.

Tras realizar diferentes pruebas se configuró cada line array de manera que se lograron cumplir los objetivos tanto de cobertura uniforme como de relación señal/ruido. La configuración final de cada line array fue de un ángulo de inclinación de  $-0.79^\circ$  y una altura de 7.35 m. Además, se aplicó una ecualización por bandas de octava (Figura 6.15) para ajustar los niveles de SPL, de manera que se lograra para cada banda de octava una relación señal/ruido de por lo menos 25 dB sin llegar a niveles de presión sonora que pudiesen ser molestos para el público. La configuración de los filtros se puede exportar a EASE para comprobar el comportamiento del equipo con las mismas condiciones en las que se ha configurado en EASE Focus.



*Figura 6.13. Diagramas polares del line array utilizado compuesto por tres cajas TOA SR-C8S para las frecuencias de 500 Hz (arriba a la izquierda), 1 kHz (arriba a la derecha), 2 kHz (abajo a la izquierda) y 4 kHz (abajo a la derecha).*

Cabe destacar que los niveles de relación señal/ruido se han ajustado con respecto a los valores estimados de ruido de fondo. No obstante, en caso de darse situaciones con un nivel de ruido de fondo más elevado, se puede aplicar ganancia a cada uno de los line arrays de manera que se siga manteniendo la relación señal/ruido de 25 dB. De la misma manera, se pueden modificar las ganancias en caso de existir un nivel menor de ruido de fondo, para obtener niveles de presión sonora más bajos.

Por otra parte, el nivel máximo de SPL con ponderación A en banda completa con la configuración final es de 99.5 dB(A), de manera que no se alcanzan los 100 dB(A), valor límite establecido por la Organización Mundial de la Salud a partir del cual se produce incomodidad auditiva. Con todo, en caso de que se compruebe que el nivel de ruido de fondo es más bajo que el aquí supuesto, se recomienda encarecidamente la reducción de la ganancia del sistema de refuerzo sonoro.

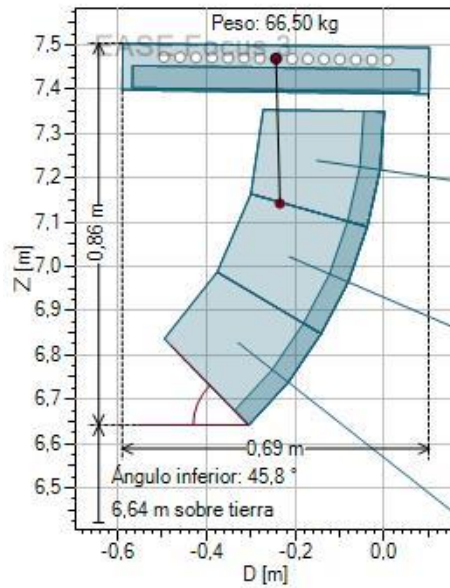


Figura 6.14. Configuración final del line array compuesto por tres cajas TOA SR-C8S.

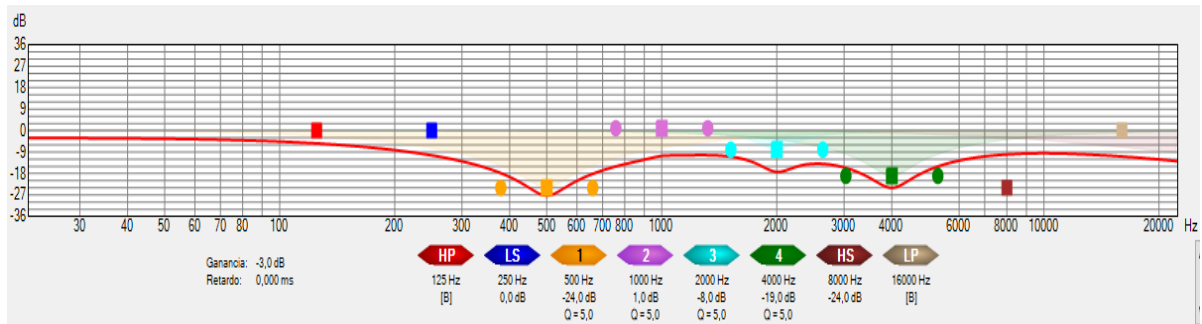


Figura 6.15. Ecualización utilizada para cada uno de los line arrays.

A continuación, se muestran en las Figuras 6.16, 6.17, 6.18 y 6.19 los niveles de relación señal/ruido en las diferentes zonas de audiencia obtenidos con la configuración final, y en las Figuras 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23 se muestran los valores de SPL directo obtenidos. Tanto los niveles de relación señal/ruido como los de SPL directo representados corresponden a las bandas de octava desde 500 Hz hasta 4 kHz.

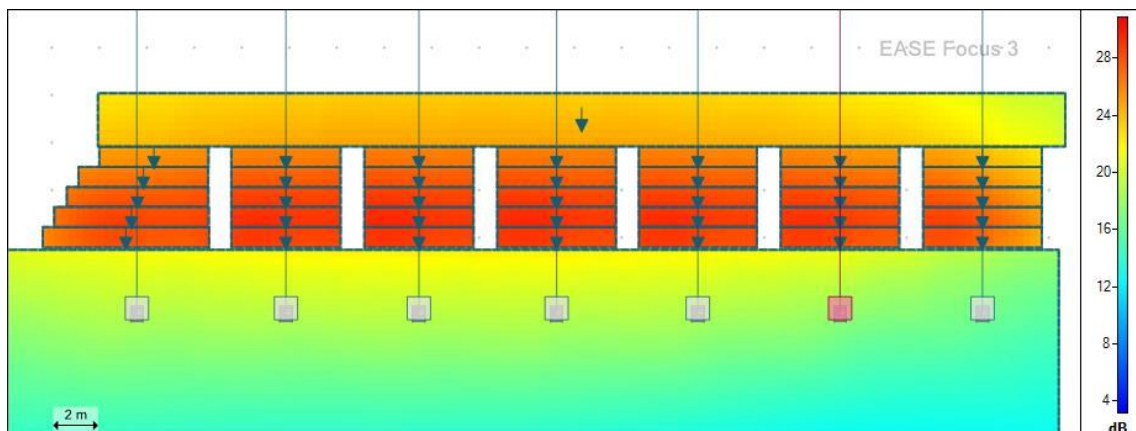


Figura 6.16. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 500 Hz.



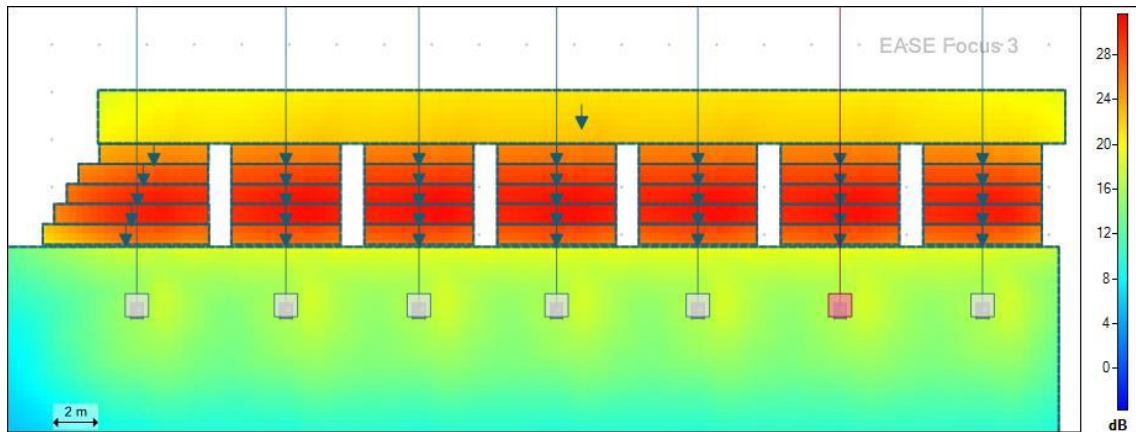


Figura 6.17. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 1 kHz.

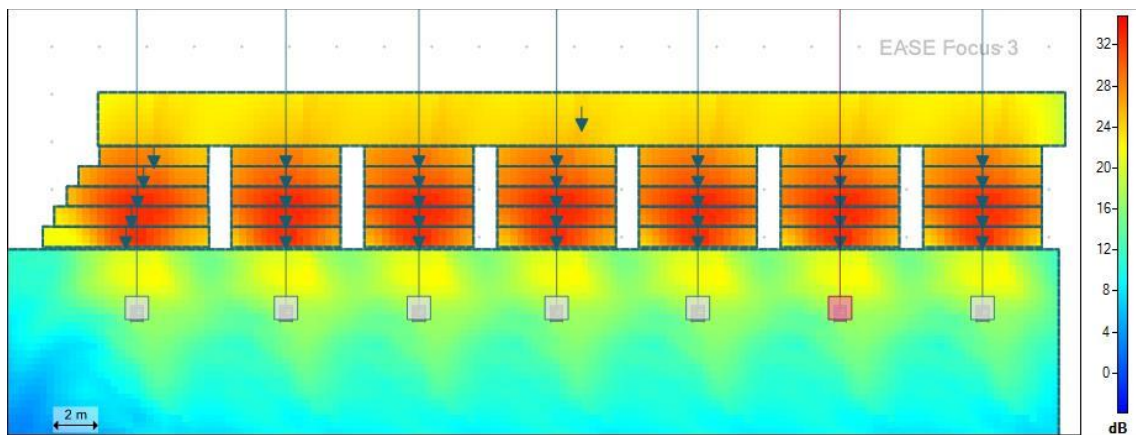


Figura 6.18. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 2 kHz.

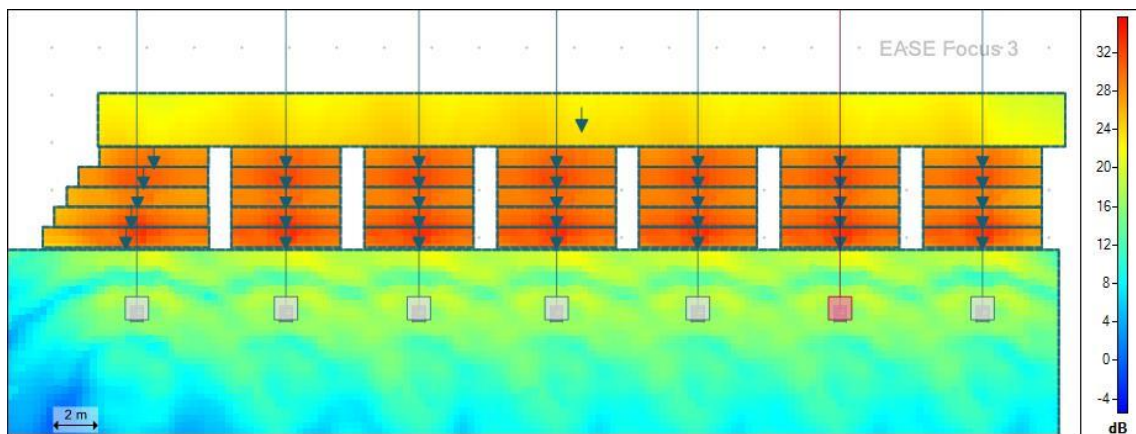


Figura 6.19. Representación de los niveles de relación señal/ruido para la banda de octava de 4 kHz.

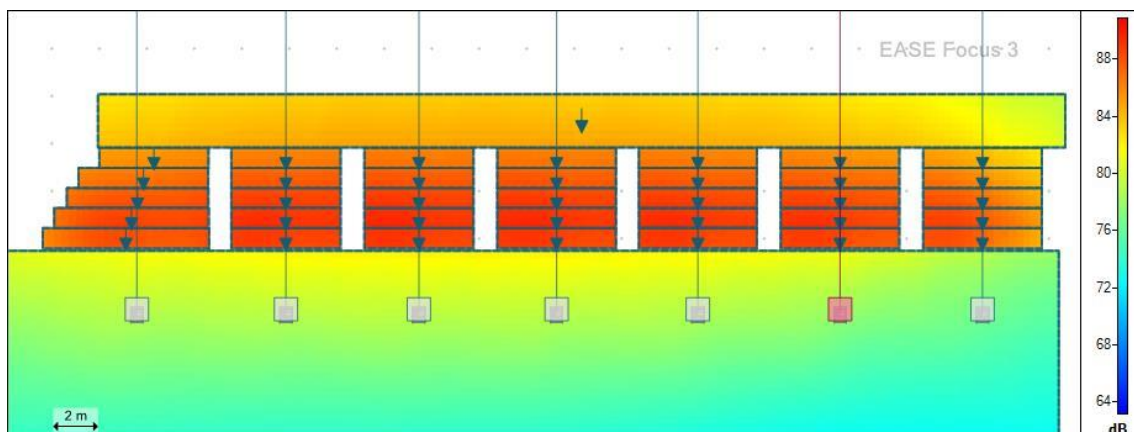


Figura 6.20. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 500 Hz.

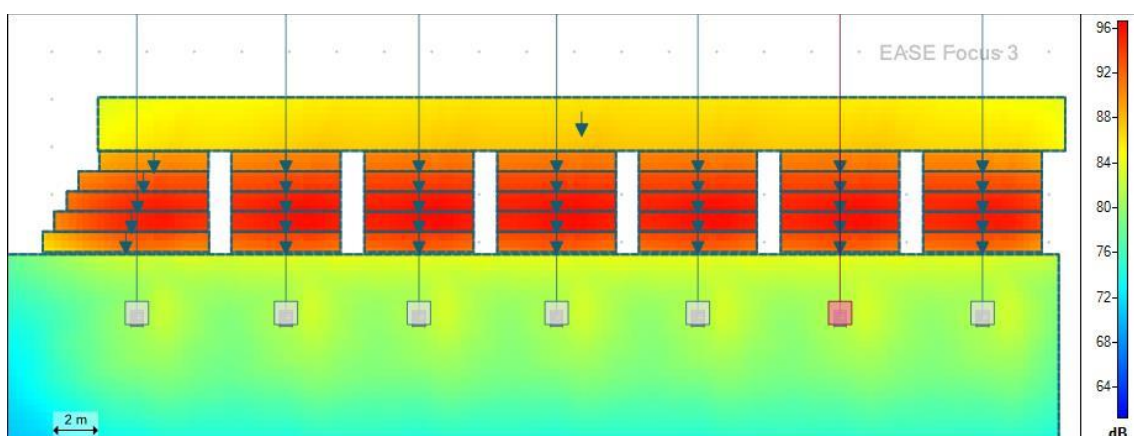


Figura 6.21. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 1 kHz.

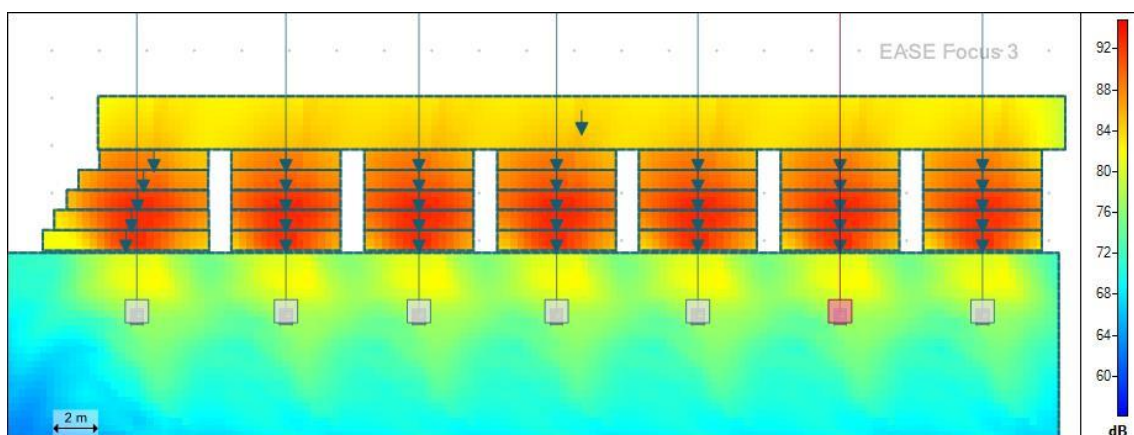


Figura 6.22. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 2 kHz.

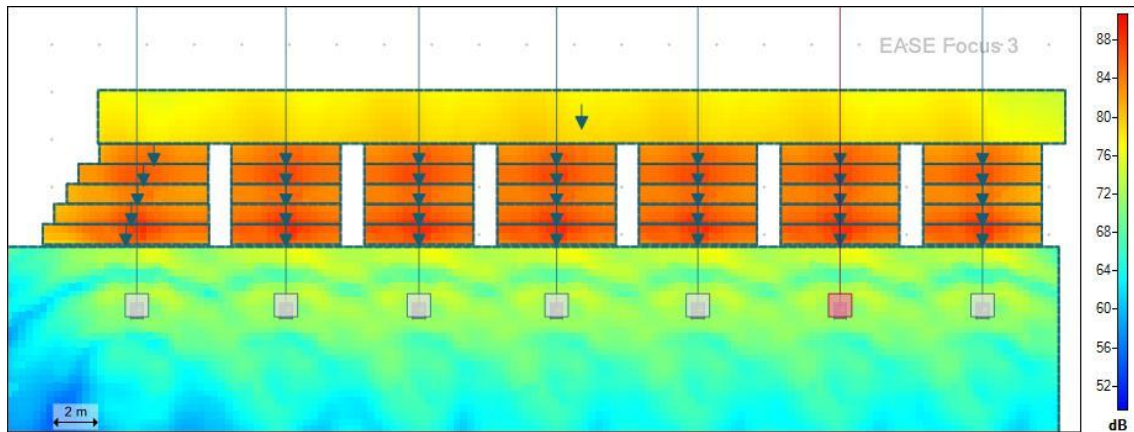


Figura 6.23. Representación de los niveles de SPL directo sin ponderación para la banda de octava de 4 kHz.

### 6.3.2. Diseño del refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica

Los objetivos a conseguir con el refuerzo sonoro destinado a la sonorización de las exhibiciones de gimnasia rítmica son los mismos que en las gradas: cobertura uniforme y buena relación señal ruido.

Debido a las necesidades en este tipo de competiciones de escuchar tanto música como voz, se eligió como primera opción utilizar unos altavoces *full range* (que emite en el rango completo de frecuencias audibles). Tras barajar diferentes opciones, se optó por utilizar unos altavoces que proporcionasen una amplia cobertura tanto horizontal como vertical, de manera que se pudiesen cubrir las necesidades de la sonorización sin utilizar un número excesivo de ellos. Los elegidos finalmente fueron el modelo VX 12 de la marca Tannoy.



Figura 6.24. Tannoy VX 12.

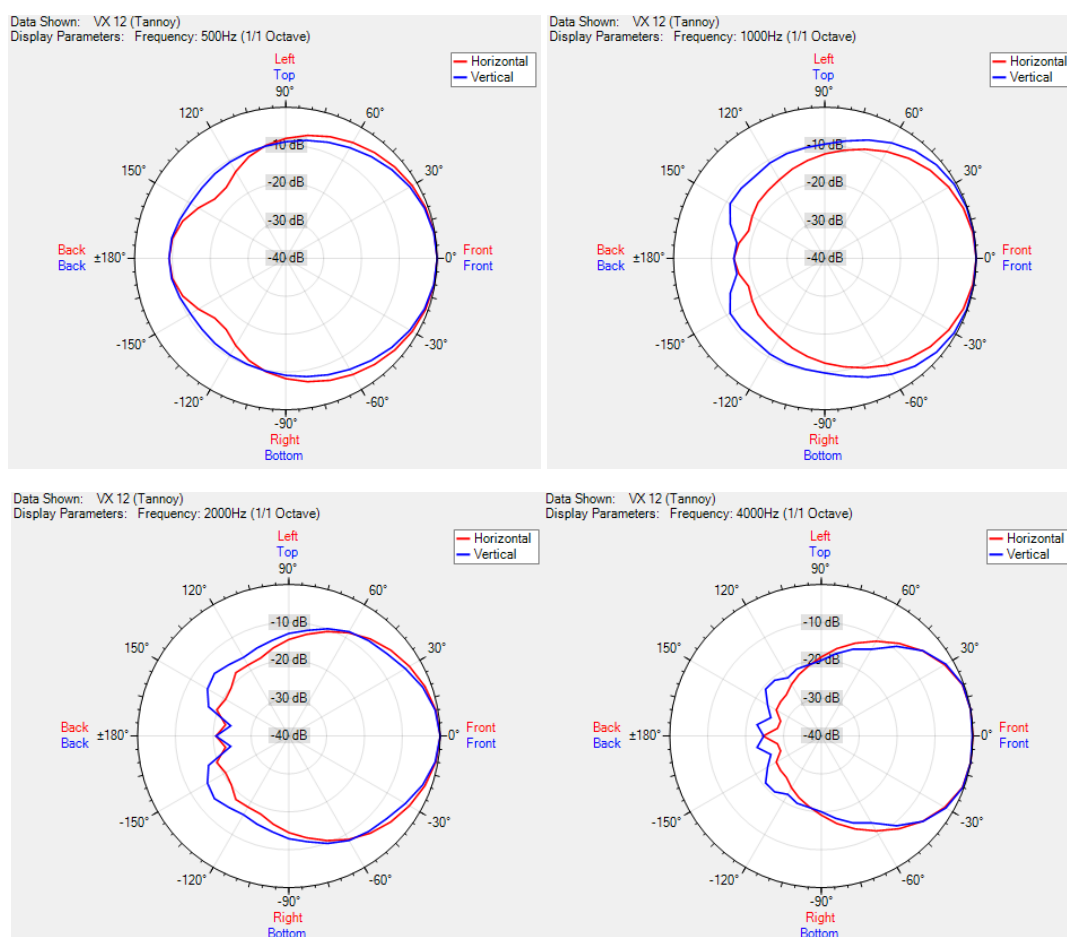


Figura 6.25. Diagramas polares del modelo VX 12 de Tannoy para las frecuencias de 500 Hz (arriba a la izquierda), 1 kHz (arriba a la derecha), 2 kHz (abajo a la izquierda) y 4 kHz (abajo a la derecha).

Los niveles de ruido de fondo establecidos para la simulación en pista fueron menores que los utilizados en las gradas, estimando un nivel de 10 dB menos en cada banda de octava (Tabla 6.2).

Frecuencia (Hz)	Nivel de ruido (dB)
31.5	35
63	35
125	35
250	45
500	50
1000	55
2000	50
4000	45
8000	25
16000	25

Tabla 6.2. Niveles de ruido de fondo estimados para la pista.

Las exhibiciones de gimnasia rítmica tienen lugar en la parte central de la pista, por lo que esta parte del diseño se centró en conseguir en esa zona una cobertura uniforme y una buena relación señal/ruido.

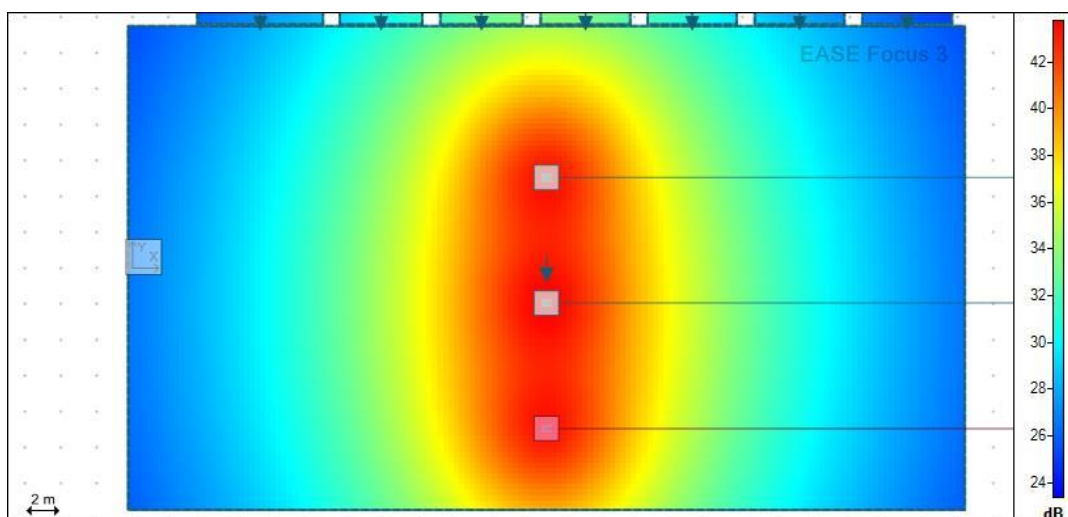


También se tuvo en cuenta el hecho de la utilización del tercio central para competencias de bádminton y voleibol, al igual que las divisiones laterales, por lo que se trató de diseñar un sistema versátil en esta parte de la pista que sirviese tanto para las exhibiciones de gimnasia rítmica como para el resto de actividades.

Al igual que en caso de los line arrays utilizados para las gradas, se pensó en poder colgar las cajas de una estructura anclada a las vigas, por lo que se probaron alturas en torno a los 7 m.

En primer lugar, se probó a colocar tres cajas en fila separadas a diferentes distancias y situadas a diferentes alturas, estableciendo finalmente una separación entre cajas de 7 m y una altura de 7.5 m. Se comprobó que de esta forma el equipo ofrecía buenos resultados para el refuerzo del tercio central de la pista, cumpliendo con creces el requisito establecido para este tipo de actividades, que es lograr una buena relación señal/ruido (Figuras 6.26, 6.27, 6.28 y 6.29). No obstante, se pensó que tal vez este refuerzo podía ser insuficiente para proporcionar una cobertura uniforme para las exhibiciones de gimnasia rítmica, por lo que se probó a insertar otros dos altavoces a ambos lados del situado del centro y a la misma distancia de 7 m, creando una forma de cruz. Tras examinar los resultados, se comprobó que esta configuración cumplía con los objetivos impuestos para la sonorización de las exhibiciones de gimnasia rítmica, ya que proporciona cobertura uniforme de  $\pm 3$  dB en las bandas de octava de 500 Hz a 2 kHz (Figuras 6.30, 6.31, 6.32 y 6.33) y una relación señal/ruido superior a 25 dB (Figuras 6.34, 6.35, 6.36 y 6.37).

Por otra parte, se aplicó a cada altavoz una ganancia de -6 dB para no llegar a niveles que pudiesen ser molestos o perjudiciales para la salud, obteniendo finalmente un nivel cuyo valor máximo es de 99.5 dB(A) en banda completa. Al igual que en el caso de los line array utilizados en las gradas, en caso de necesitar más o menos nivel, es posible variar los niveles modificando la ganancia de cada caja.



*Figura 6.26. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 500 Hz.*

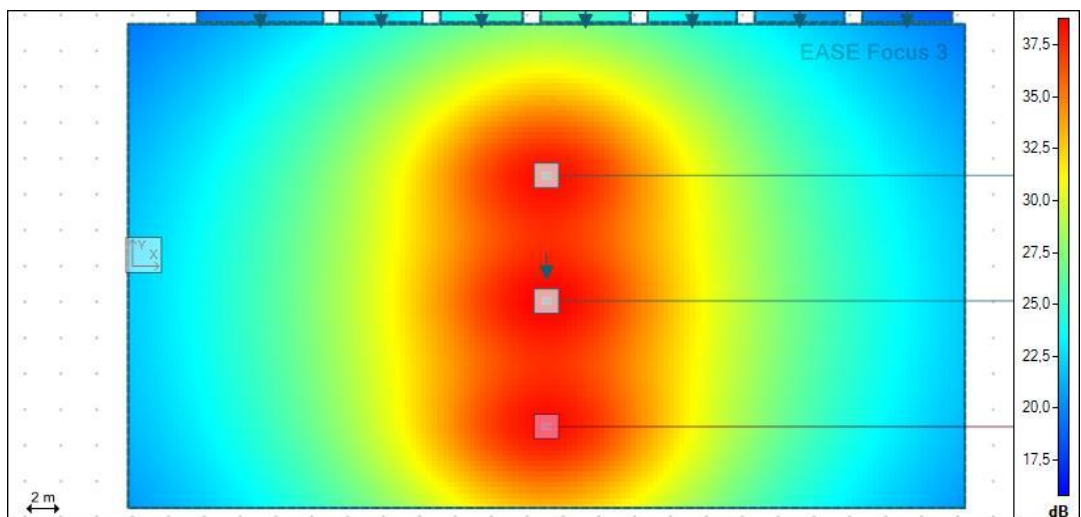


Figura 6.27. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 1 kHz.

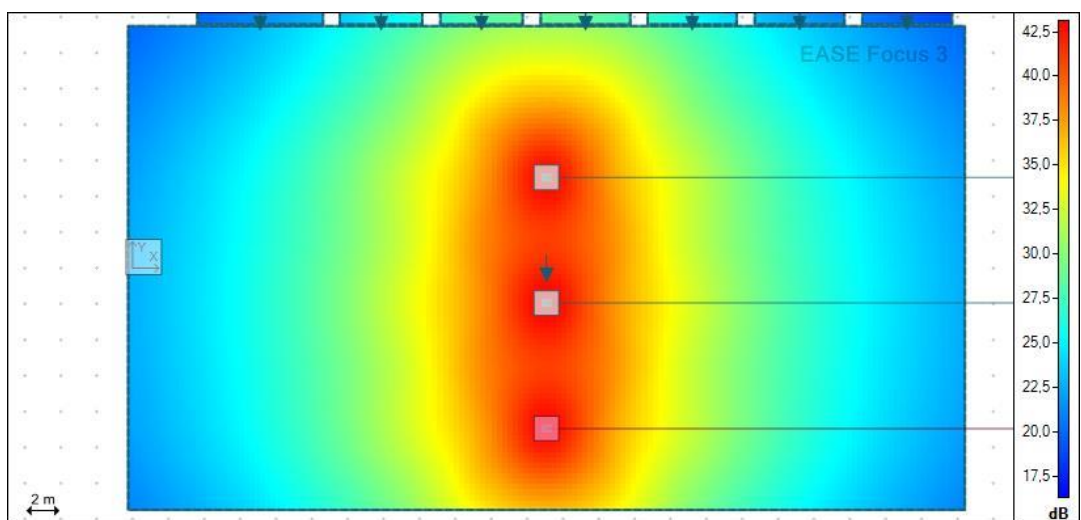


Figura 6.28. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 2 kHz.

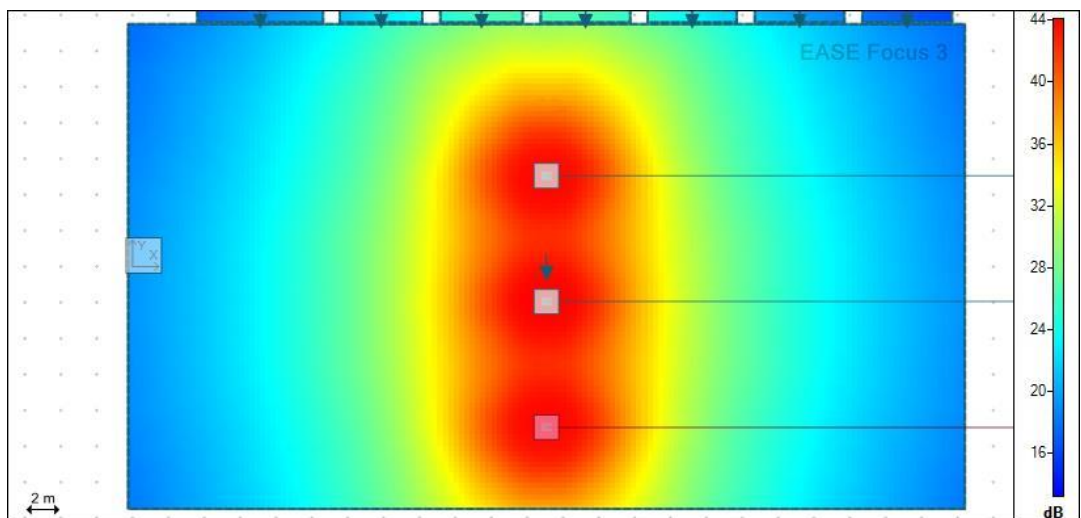


Figura 6.29. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 4 kHz.

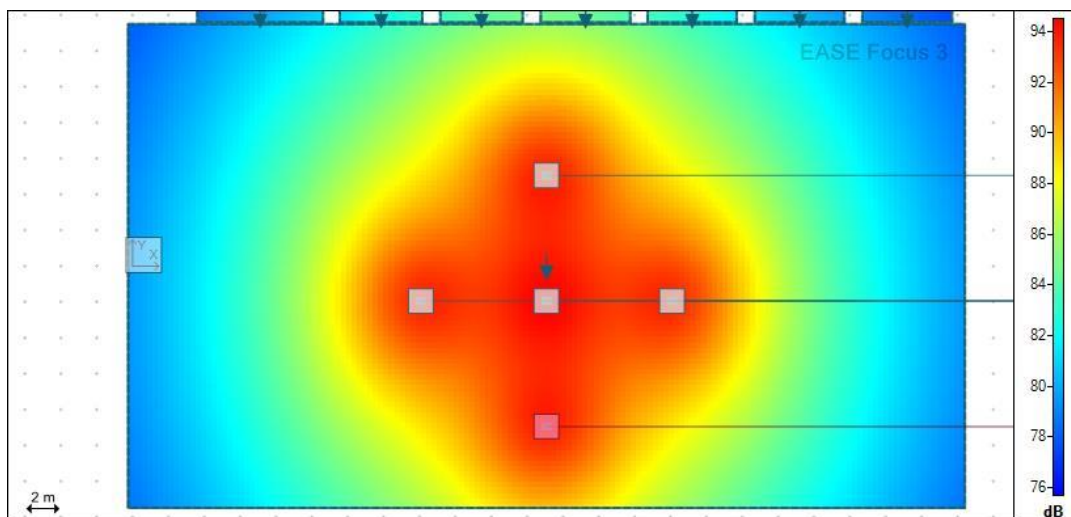


Figura 6.30. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.

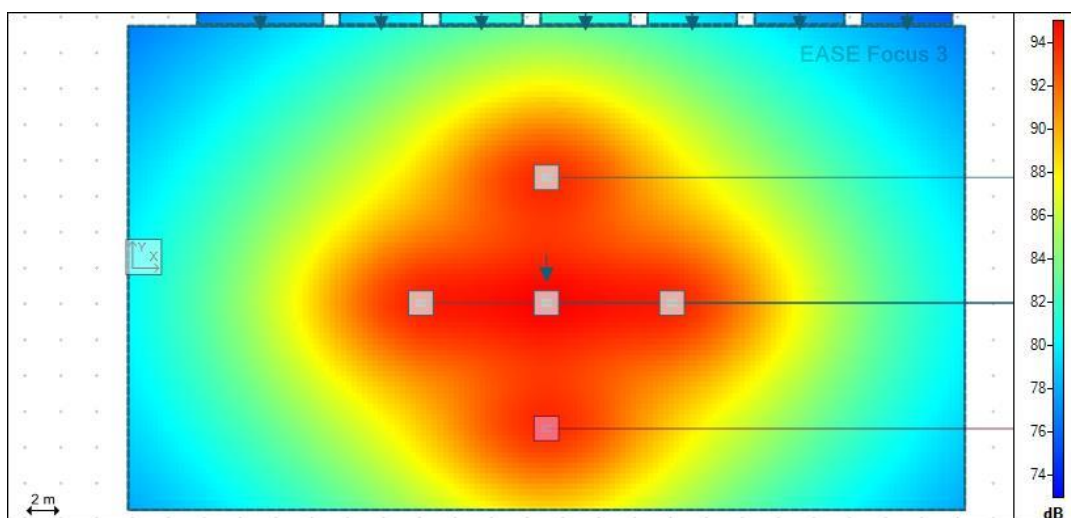


Figura 6.31. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.

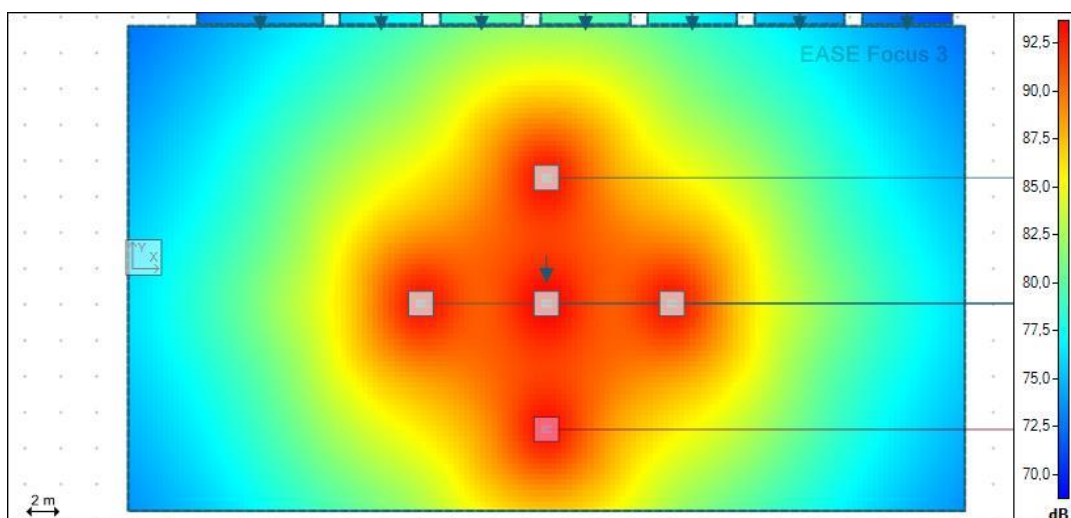


Figura 6.32. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.



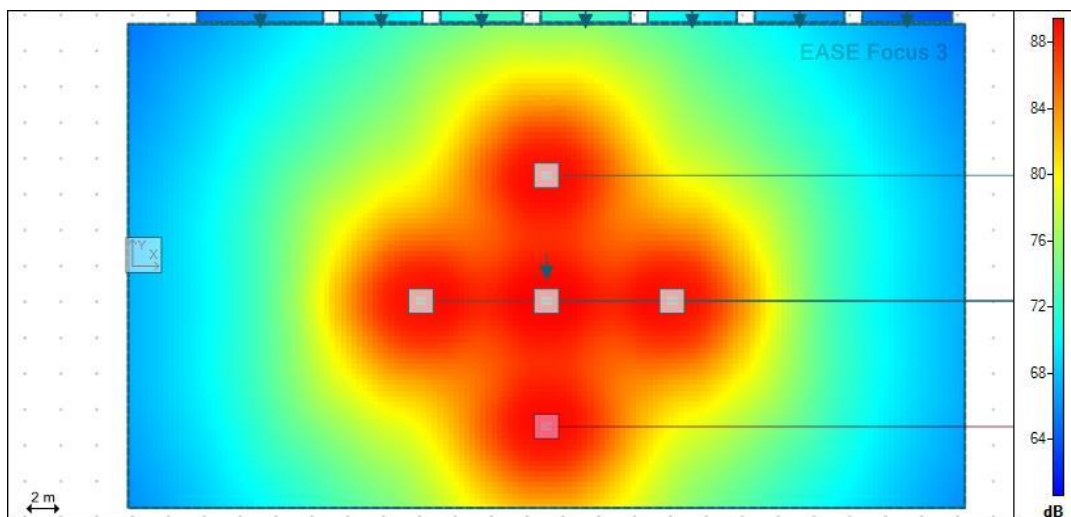


Figura 6.33. Representación de los niveles de SPL directo del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 4 kHz.

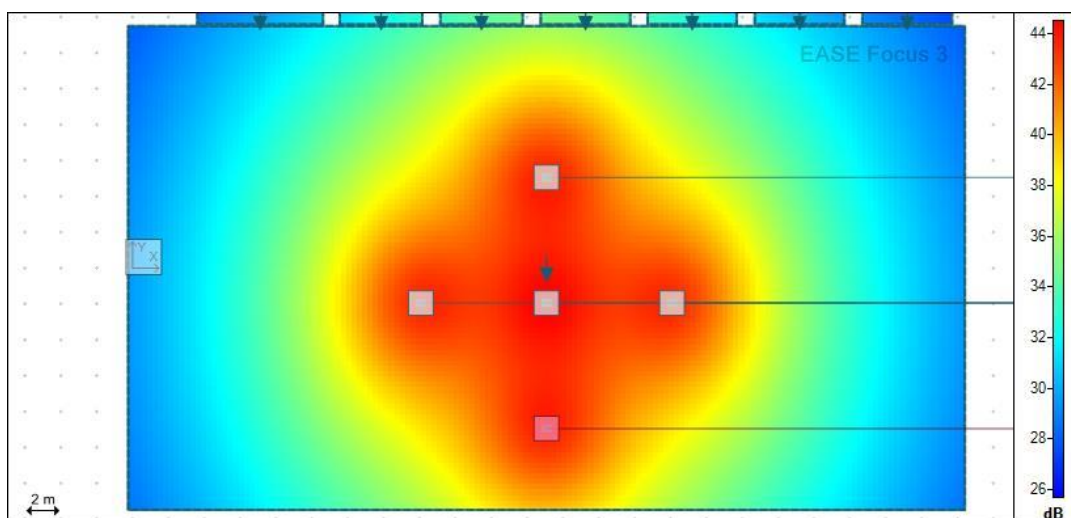


Figura 6.34. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.

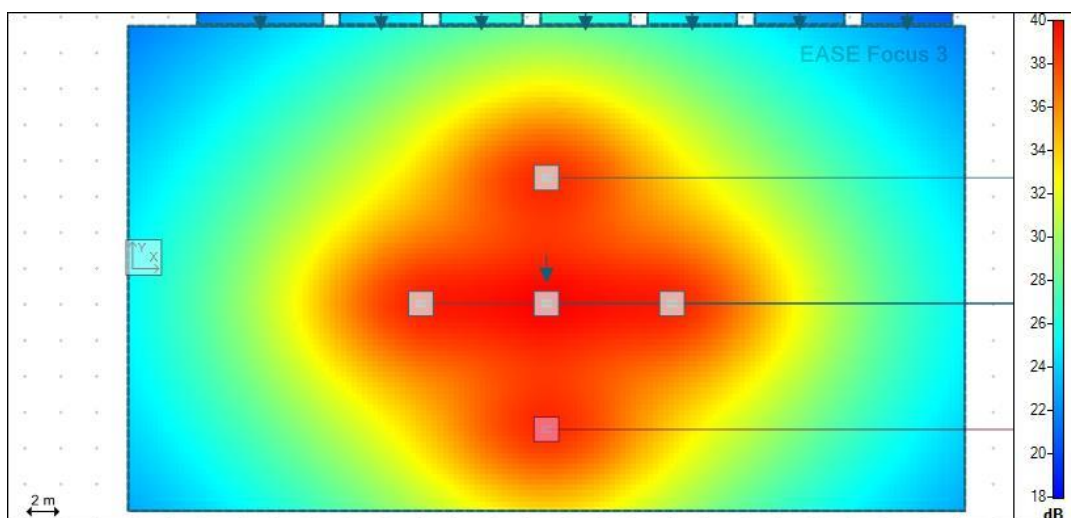


Figura 6.35. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.

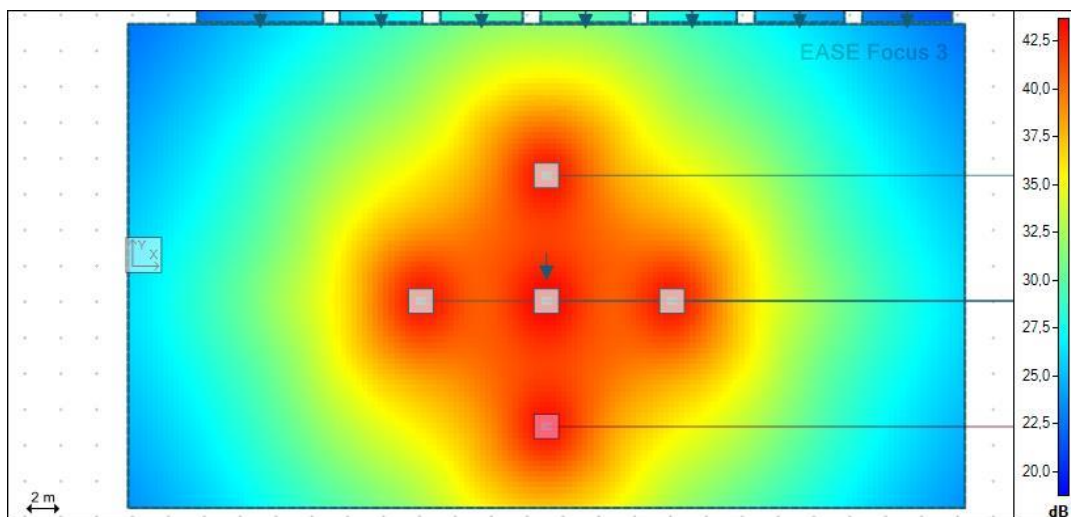


Figura 6.36. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.

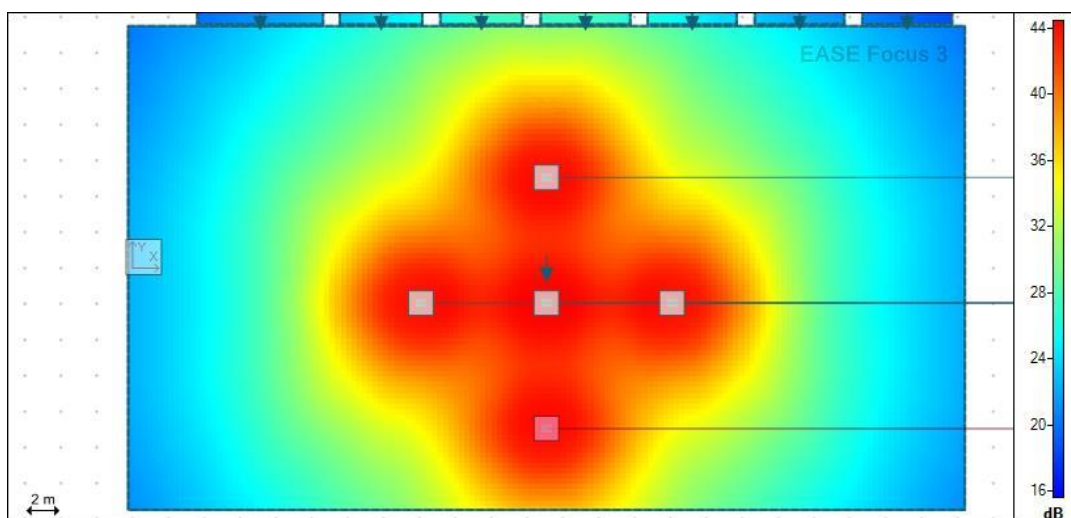


Figura 6.37. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo sonoro para gimnasia rítmica para la banda de octava de 4 kHz.

### 6.3.3. Diseño del refuerzo sonoro para las divisiones laterales

El requerimiento principal en la sonorización de las divisiones laterales de la pista es lograr una buena relación señal/ruido que garantice una correcta inteligibilidad de los mensajes hablados.

Para el refuerzo de los laterales de la pista se optó por utilizar el mismo equipo que el utilizado para sonorizar la división central al ver los buenos resultados conseguidos. Se situó una fila de tres cajas sobre la parte central de cada tercio lateral a la misma altura que en el centro de la pista (7.5 m) y con la misma separación entre cajas (7 m). Se comprobó que se cumplía el criterio de obtener un nivel de relación señal/ruido de por lo menos 25 dB, por lo que se dio por buena esta configuración.

En las Figuras 6.38, 6.39, 6.40 y 6.41 se muestran los resultados obtenidos de relación señal/ruido para las octavas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz. El símbolo circular negro que aparece en algunos altavoces indica que están desactivados.

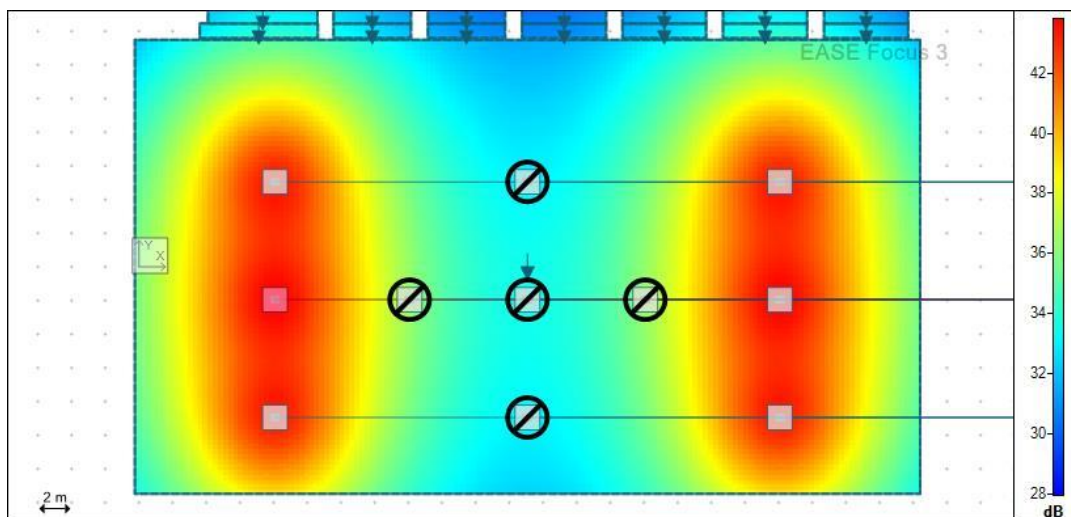


Figura 6.38. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 500 Hz.

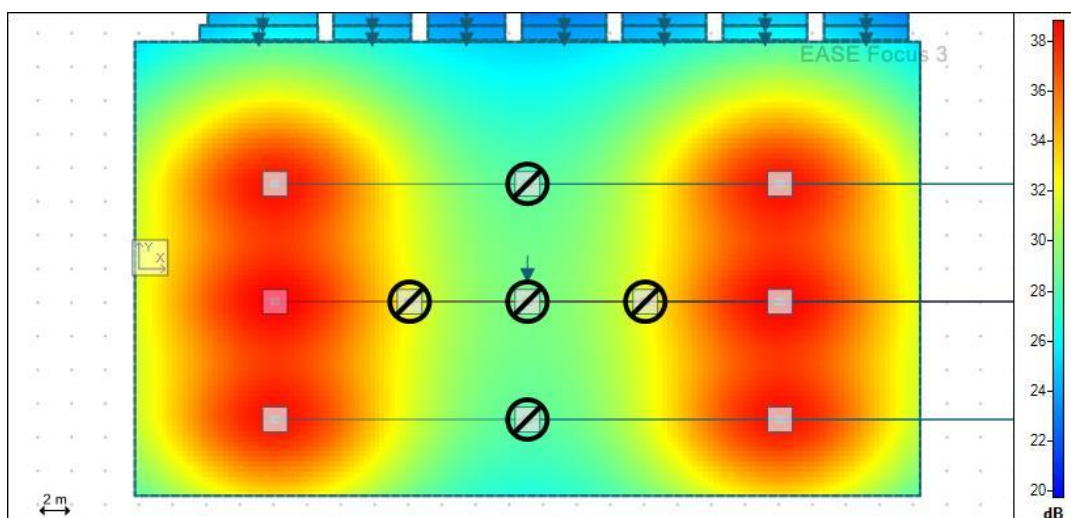


Figura 6.39. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 1 kHz.

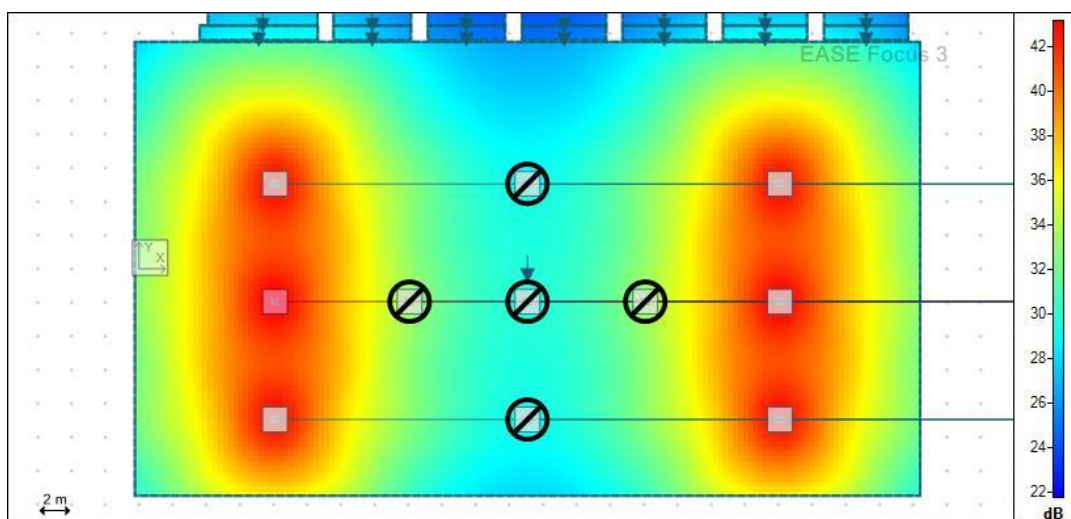


Figura 6.40. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 2 kHz.



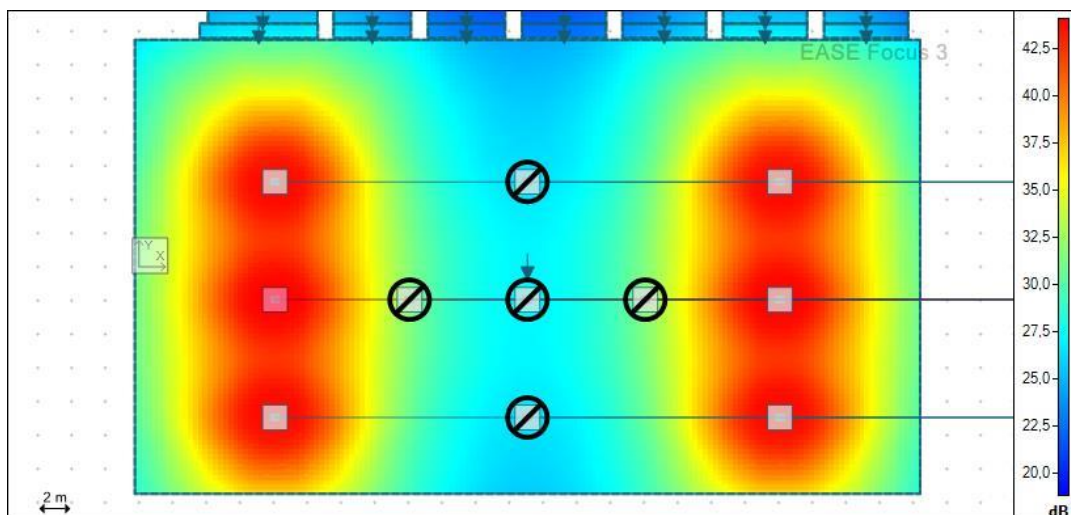


Figura 6.41. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de los tercios laterales para la banda de octava de 4 kHz.

### 6.3.3.1. Diseño del refuerzo sonoro para competiciones de baloncesto y fútbol sala

El último requerimiento del diseño era conseguir un nivel suficiente de relación señal ruido en toda la pista para la celebración de competiciones de baloncesto y fútbol sala. Los partidos tanto de baloncesto como de fútbol sala se celebran en la pista completa. La cancha de baloncesto tiene unas dimensiones de 28 m x 15 m y el campo de fútbol sala tiene unas dimensiones de 40 m x 20 m.

A la vista de la disposición de las filas de altavoces situados sobre las partes centrales de cada división, se estudió la posibilidad de utilizarlas en funcionamiento a la vez para utilizarlas de refuerzo para toda la pista. Para comprobar esta posibilidad, se simuló en el software y se comprobó que cumplían con el requerimiento de obtener un nivel de 25 dB de relación señal/ruido tanto para las dimensiones de la cancha de baloncesto como para las de la pista de fútbol sala, por lo que se dio como buena esta solución. A continuación, se muestran en las Figuras 6.42, 6.43, 6.44 y 6.45 los resultados de nivel de relación señal/ruido obtenidos en la pista completa con la solución adoptada. Cabe citar que, en caso de que se deseara, se podrían activar los once altavoces de la pista para tener una cobertura incluso algo mejor.

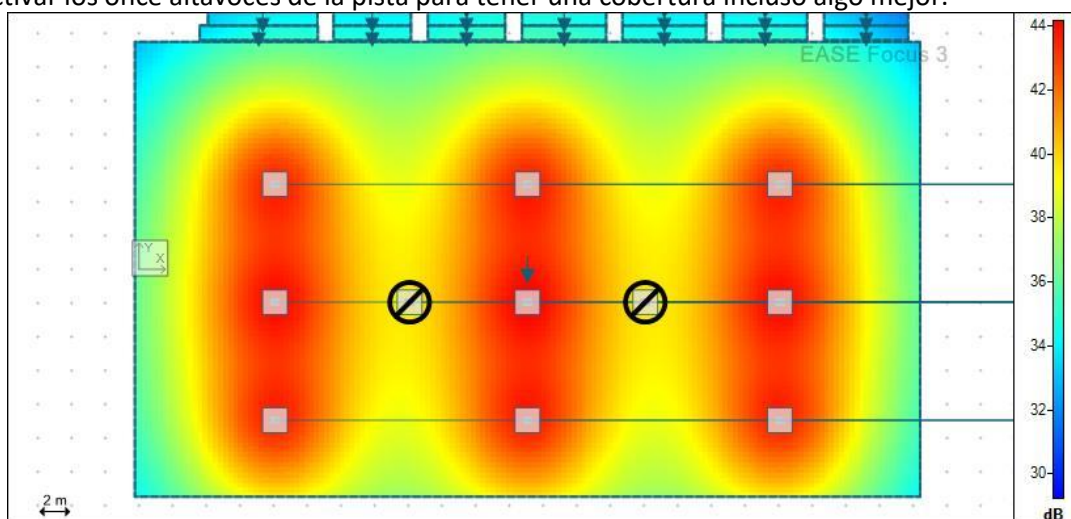


Figura 6.42. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 500 Hz.

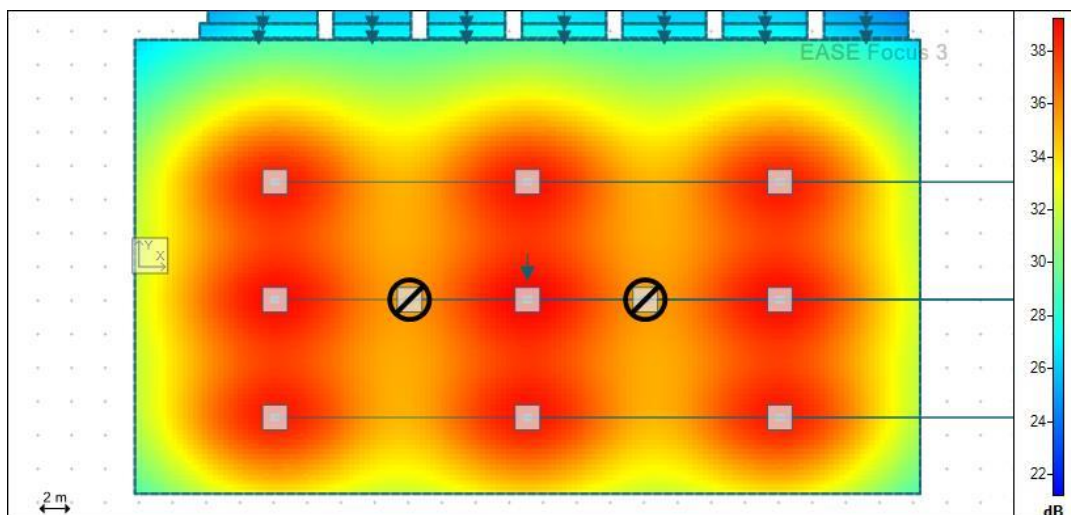


Figura 6.43. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 1 kHz.

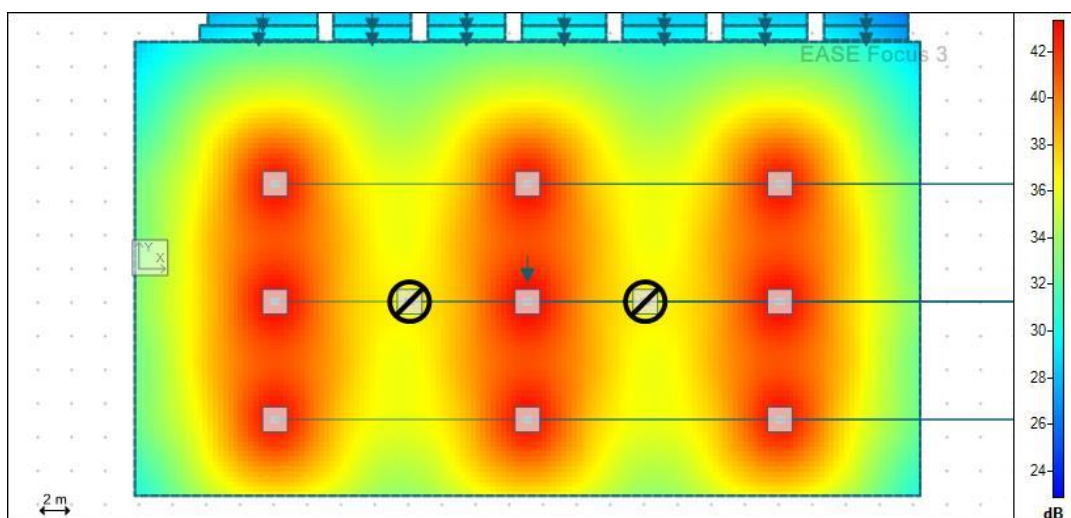


Figura 6.44. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 2 kHz.

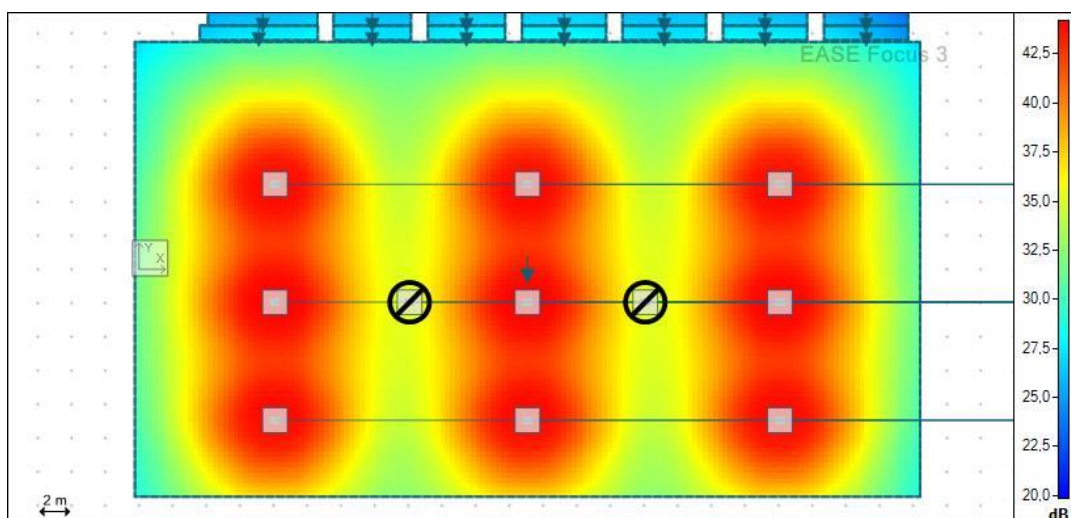


Figura 6.45. Representación de los niveles de relación señal/ruido del refuerzo de la pista completa para la banda de octava de 4 kHz.



## **7. Simulación con EASE del refuerzo sonoro propuesto**

### **7.1. Parámetros a simular con EASE**

El objetivo de la simulación con EASE del refuerzo sonoro diseñado con EASE Focus fue obtener los valores de los parámetros que no se pudieron simular con este último, ya que para los cálculos que lleva a cabo no tiene en cuenta la interacción del recinto, y así tener una idea más aproximada del comportamiento real del equipo una vez instalado. De esta manera, con EASE se obtuvieron los valores de tiempos de reverberación, nivel de presión sonora total y los parámetros que permiten determinar si el refuerzo sonoro cumple con los criterios de inteligibilidad expuestos en el Capítulo 3.

Los parámetros a simular fueron:

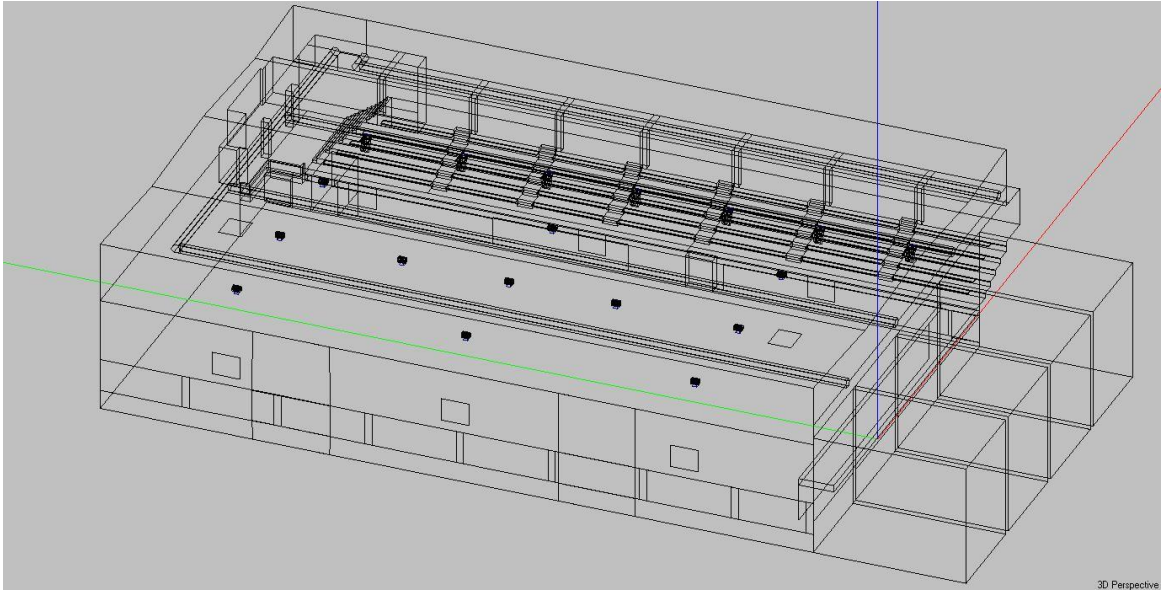
- Tiempos de reverberación
- SPL total
- %ALCons
- STI

Para las diferentes simulaciones llevadas a cabo se introdujeron los mismos valores de ruido de fondo utilizados en el diseño realizado con EASE Focus, los cuales, tal y como se comentó en el capítulo anterior, se consideran constantes para todo el recinto.

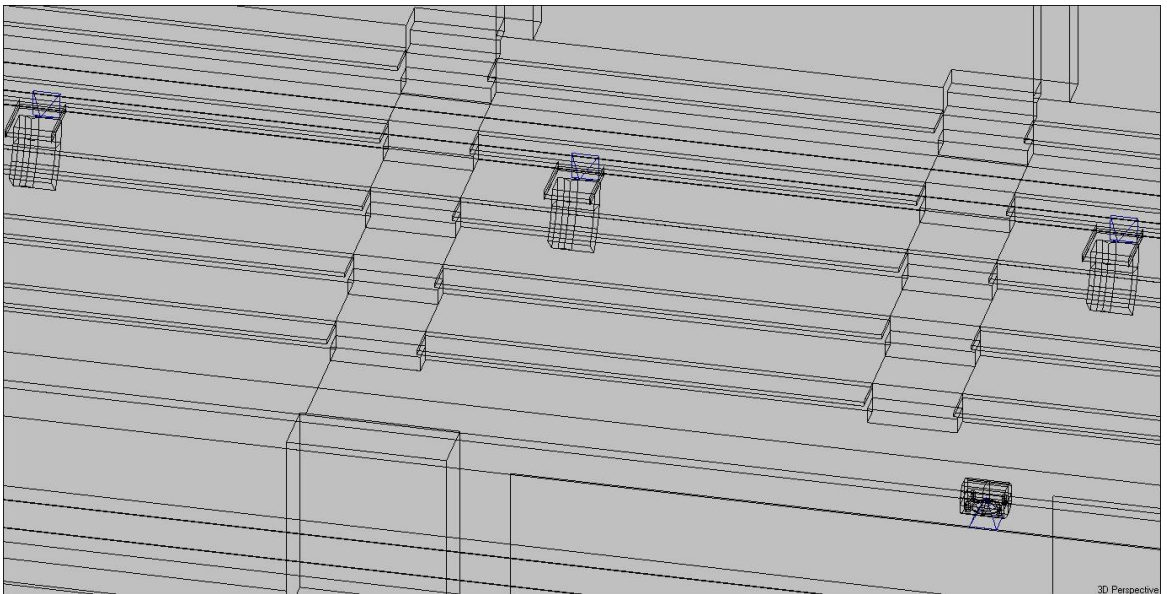
### **7.2. Inserción del refuerzo sonoro en EASE**

El primer paso fue introducir el refuerzo sonoro diseñado y configurarlo de la misma manera que en EASE Focus.

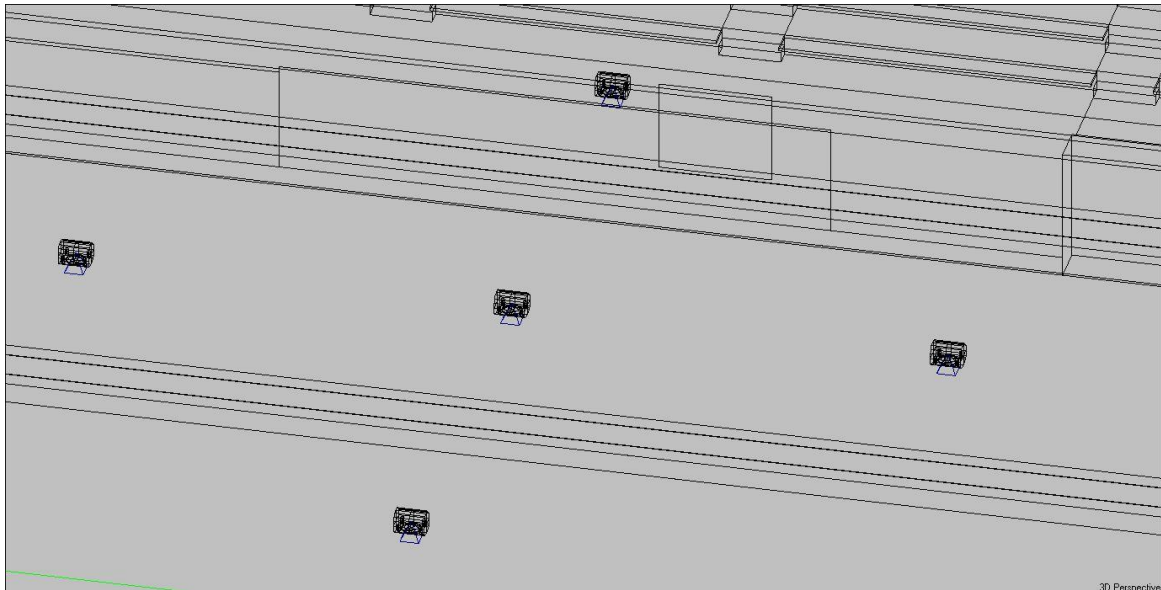
Las canastas de la cancha de baloncesto se dibujaron de diferente forma a como estaban en el modelo original descrito en el Capítulo 5, ya que en éste se dispusieron en la misma posición en la que estaban cuando se obtuvieron las medidas 'in situ' con el fin de reproducir de la manera más próxima a la realidad posible las condiciones en las que se realizaron las mediciones para que el ajuste fuera lo más correcto posible. Sin embargo, para las simulaciones que se incluyen en este capítulo, las canastas se situaron en la posición en la que se encuentran cuando están totalmente recogidas, situación más habitual cuando se desarrollan competiciones deportivas en las que no se utilizan.



*Figura 7.1. Recinto con los siete line array destinados al refuerzo sonoro de las gradas y las siete cajas utilizadas para la pista.*



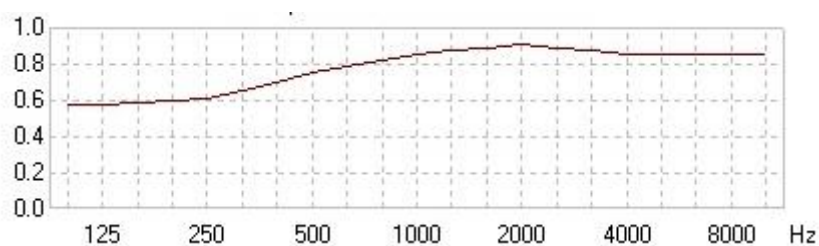
*Figura 7.2. Detalle del refuerzo sonoro de las gradas.*



*Figura 7.3. Detalle del refuerzo sonoro para las exhibiciones de gimnasia rítmica.*

### **7.3. Tiempos de reverberación**

El tiempo de reverberación del recinto es el único de los parámetros que aquí se describen que es independiente de la sonorización utilizada, solo dependiendo de las características del recinto. Esta magnitud se obtuvo mediante las dos aproximaciones que proporciona el software, basadas ambas en la teoría estadística, la de Sabine y la de Eyring. Además, para cada una de las expresiones se valoraron tanto la opción de encontrarse el recinto vacío como con las gradas ocupadas. Para simular la ocupación de los bancos de las gradas se cambió el material asignado a éstos por un material que simula bancos de madera ocupados, de manera que se intenta aproximar la absorción de las personas y su influencia en el campo sonoro. Este material fue también utilizado en los bancos de las gradas para el resto de simulaciones que se llevaron a cabo.



*Figura 7.4. Coeficientes de absorción del material utilizado para simular la ocupación de los bancos de las gradas.*

A continuación, se muestran los resultados de tiempo de reverberación (en segundos) obtenidos para cada tercio de octava en la columna de la izquierda y los coeficientes medios de absorción sonora, también para cada tercio de octava, en la columna de la derecha.

	Rev. Time	Absorp. Coe		Rev. Time	Absorp. Coe
100 Hz	1.17	0.35	100 Hz	1.20	0.34
125 Hz	1.67	0.24	125 Hz	1.74	0.23
160 Hz	2.04	0.20	160 Hz	2.04	0.20
200 Hz	2.61	0.16	200 Hz	2.47	0.17
250 Hz	2.88	0.14	250 Hz	2.69	0.15
315 Hz	2.89	0.14	315 Hz	2.67	0.15
400 Hz	3.48	0.12	400 Hz	3.14	0.13
500 Hz	4.39	0.09	500 Hz	3.81	0.11
630 Hz	4.38	0.09	630 Hz	3.77	0.11
800 Hz	4.58	0.09	800 Hz	3.88	0.10
1000 Hz	4.10	0.10	1000 Hz	3.50	0.11
1250 Hz	3.35	0.12	1250 Hz	2.93	0.14
1600 Hz	2.77	0.14	1600 Hz	2.47	0.16
2000 Hz	4.04	0.09	2000 Hz	3.43	0.11
2500 Hz	3.09	0.11	2500 Hz	2.72	0.13
3150 Hz	1.76	0.20	3150 Hz	1.64	0.22
4000 Hz	1.46	0.24	4000 Hz	1.37	0.25
5000 Hz	1.02	0.33	5000 Hz	0.97	0.35
6300 Hz	0.81	0.39	6300 Hz	0.78	0.41
8000 Hz	0.76	0.36	8000 Hz	0.73	0.38
10000 Hz	0.59	0.41	10000 Hz	0.57	0.42

Figura 7.5. Tiempos de reverberación obtenidos mediante la expresión de Sabine para el recinto vacío (izquierda) y con las gradas ocupadas (derecha).

	Rev. Time	Absorp. Coe		Rev. Time	Absorp. Coe
100 Hz	0.95	0.35	100 Hz	0.98	0.34
125 Hz	1.46	0.24	125 Hz	1.53	0.23
160 Hz	1.83	0.20	160 Hz	1.83	0.20
200 Hz	2.40	0.16	200 Hz	2.25	0.17
250 Hz	2.67	0.14	250 Hz	2.48	0.15
315 Hz	2.68	0.14	315 Hz	2.46	0.15
400 Hz	3.27	0.12	400 Hz	2.93	0.13
500 Hz	4.18	0.09	500 Hz	3.60	0.11
630 Hz	4.18	0.09	630 Hz	3.56	0.11
800 Hz	4.38	0.09	800 Hz	3.68	0.10
1000 Hz	3.91	0.10	1000 Hz	3.30	0.11
1250 Hz	3.16	0.12	1250 Hz	2.74	0.14
1600 Hz	2.58	0.14	1600 Hz	2.28	0.16
2000 Hz	3.87	0.09	2000 Hz	3.25	0.11
2500 Hz	2.93	0.11	2500 Hz	2.55	0.13
3150 Hz	1.60	0.20	3150 Hz	1.47	0.22
4000 Hz	1.31	0.24	4000 Hz	1.21	0.25
5000 Hz	0.86	0.33	5000 Hz	0.82	0.35
6300 Hz	0.67	0.39	6300 Hz	0.64	0.41
8000 Hz	0.65	0.36	8000 Hz	0.63	0.38
10000 Hz	0.51	0.41	10000 Hz	0.49	0.42

Figura 7.6. Tiempos de reverberación obtenidos mediante la expresión de Eyring para el recinto vacío (izquierda) y con las gradas ocupadas (derecha).

Se puede observar para cualquiera de las dos aproximaciones la influencia de la absorción ejercida por el público.

Resulta difícil determinar cuál de las dos aproximaciones se aproxima más a la realidad, debido a la escasa homogeneidad de los coeficientes de absorción para cada material utilizado, habiendo tanto materiales muy reflectantes (linóleo, hormigón, ladrillos, vidrio...) como

materiales muy absorbentes a determinadas frecuencias (materiales utilizados para modelar techo, pistas de squash, bancos de las gradas y partes parcialmente abiertas). No obstante, ambas aproximaciones presentan valores bastante elevados de tiempo de reverberación entre las bandas de tercio de octava de 200 Hz a 2.5 kHz.

## 7.4. SPL total

En este apartado se muestran los resultados de nivel de presión sonora total, suma del nivel de presión directo y el nivel de presión reverberante, obtenidos para las gradas y para las diferentes configuraciones de la pista.

De esta manera se obtiene una mayor aproximación a cómo se comporta realmente el equipo y cómo es el campo sonoro que genera en interacción con el recinto, y se comprueba la cobertura uniforme en una situación más próxima a la real.

Los resultados que se muestran son para la banda de octava de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

### 7.4.1. SPL total en las gradas

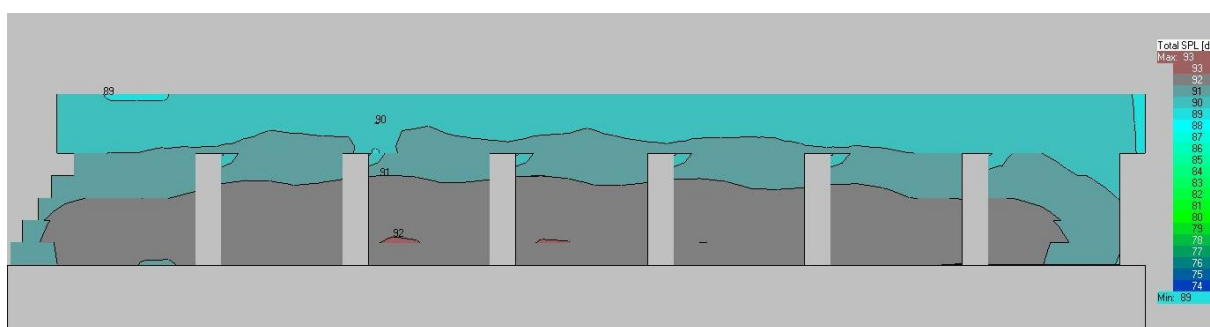


Figura 7.7. SPL total en las gradas para la banda de octava de 500 Hz.

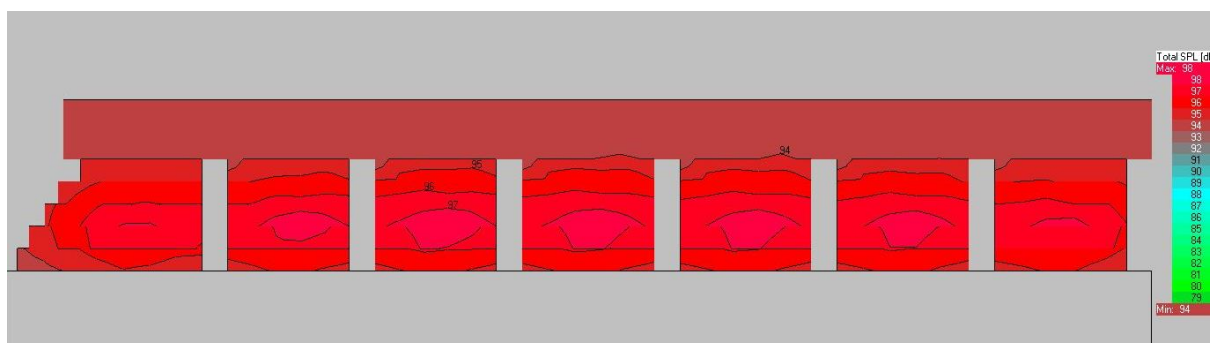
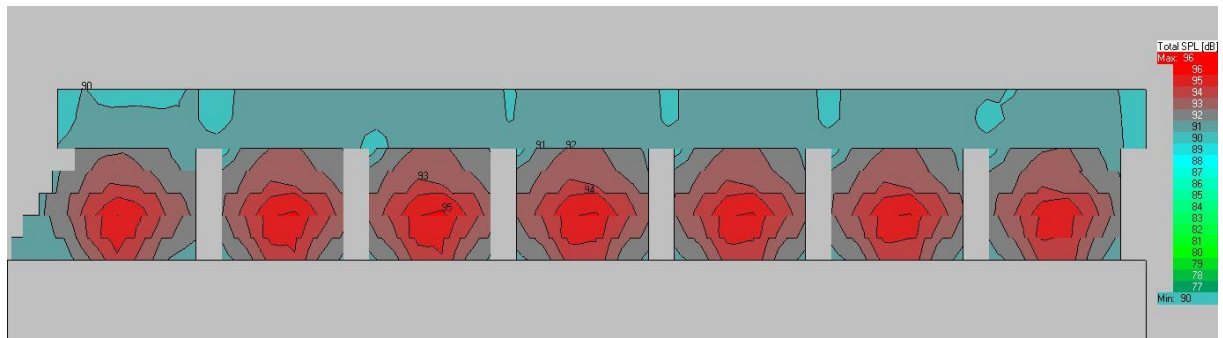
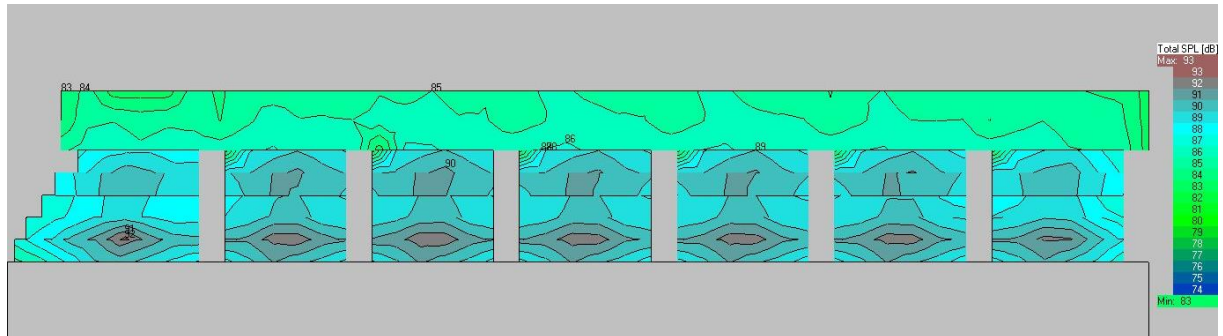


Figura 7.8. SPL total en las gradas para la banda de octava de 1 kHz.



*Figura 7.9. SPL total en las gradas para la banda de octava de 2 kHz.*



*Figura 7.10. SPL total en las gradas para la banda de octava de 4 kHz.*

A la vista de los resultados se puede determinar la existencia de un campo sonoro uniforme para toda la zona de gradas, incluyendo el pasillo situado al final de las zonas de asientos, con diferencias menores a  $\pm 3$  dB en la práctica totalidad de las gradas.

#### **7.4.2. SPL total en la pista**

A continuación, se muestran los niveles de presión sonora total para los diferentes refuerzos sonoros diseñados para la pista.

#### 7.4.2.1. Refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica

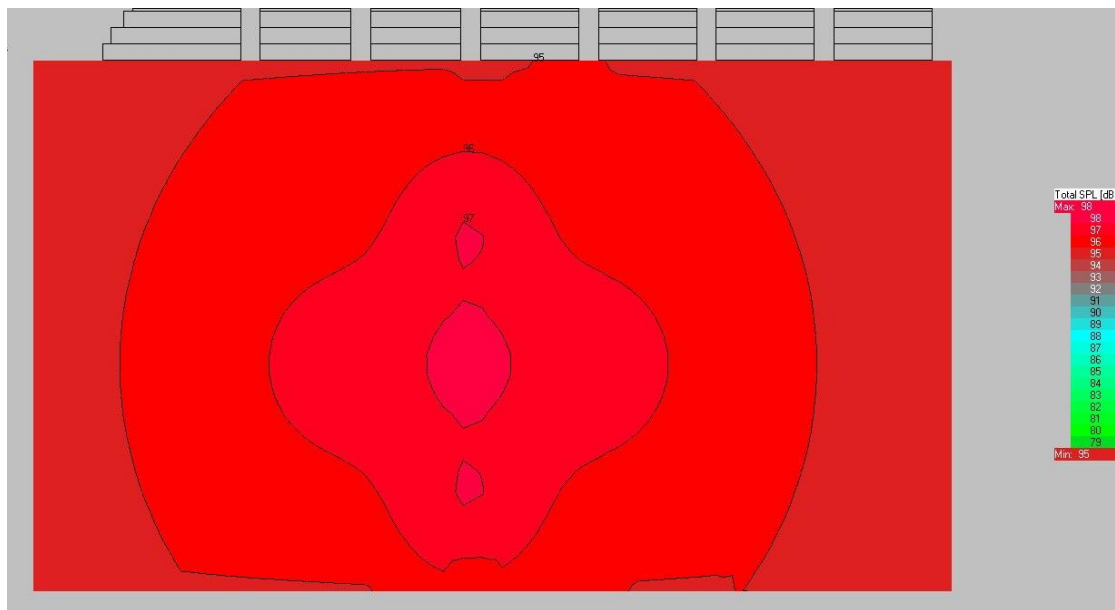


Figura 7.11. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 500 Hz.

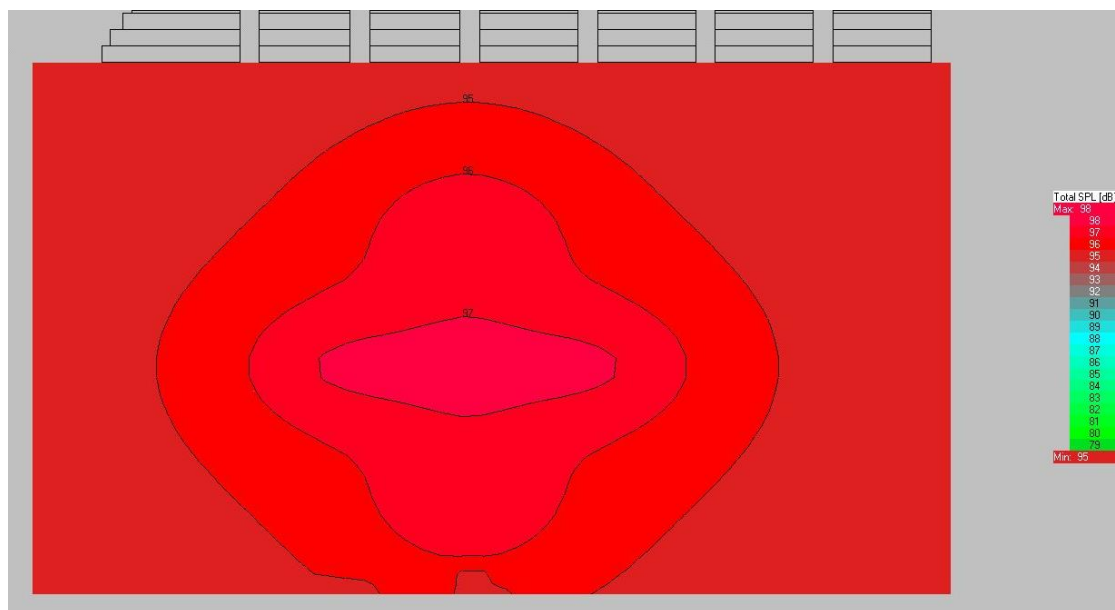
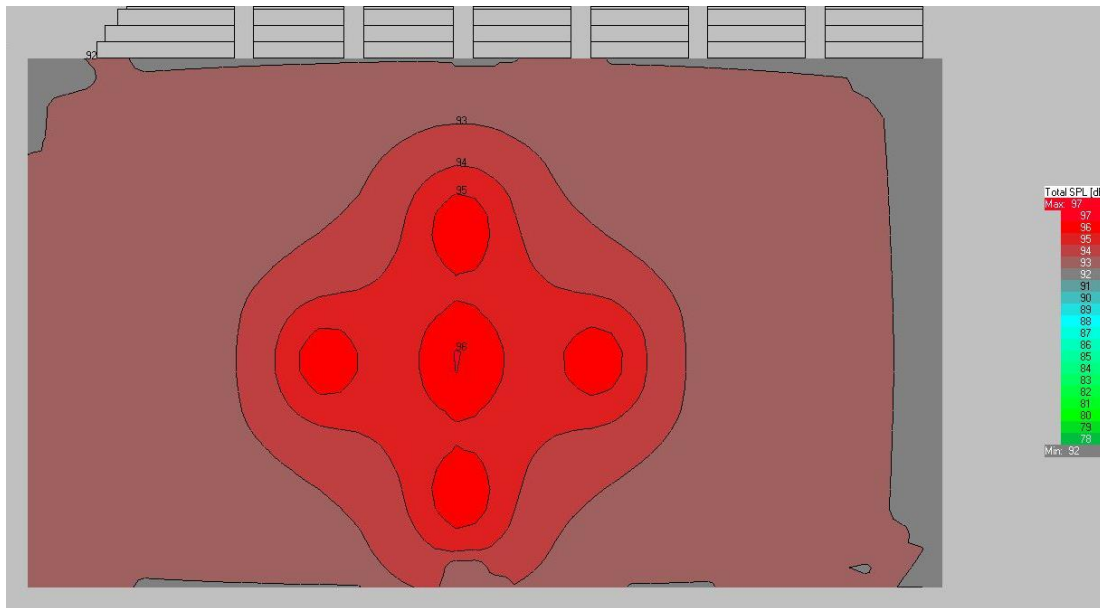
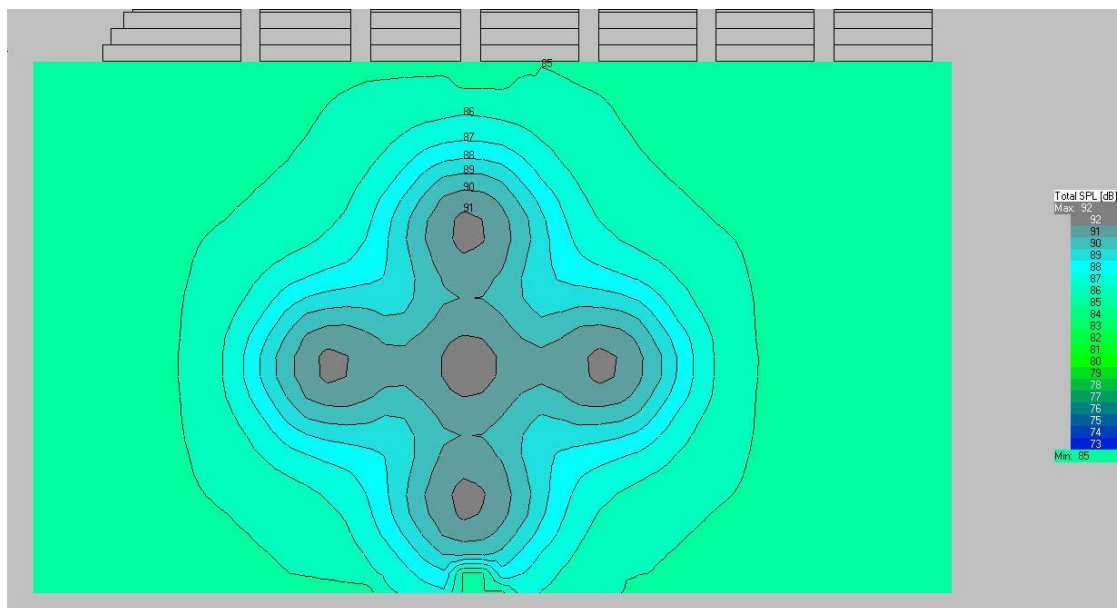


Figura 7.12. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 1 kHz.





*Figura 7.13. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.*



*Figura 7.14. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica para la banda de octava de 2 kHz.*

Tras observar los resultados se comprueba la existencia de un campo sonoro uniforme en la zona destinada a las exhibiciones de gimnasia rítmica con el refuerzo sonoro diseñado para tal fin.



#### 7.4.2.2. Refuerzo sonoro del tercio central

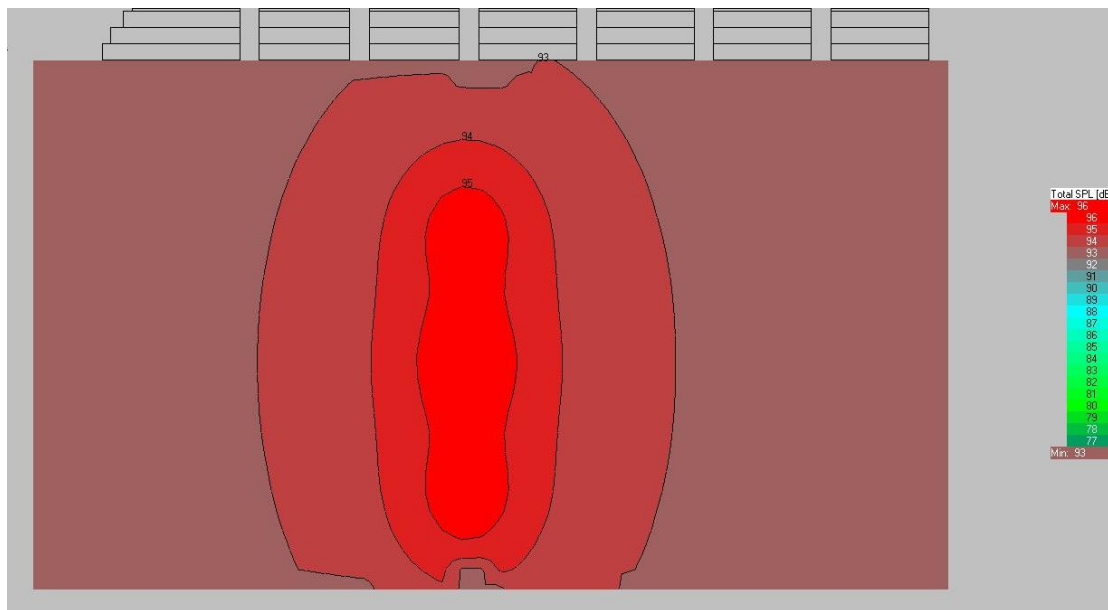


Figura 7.15. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 500 Hz.

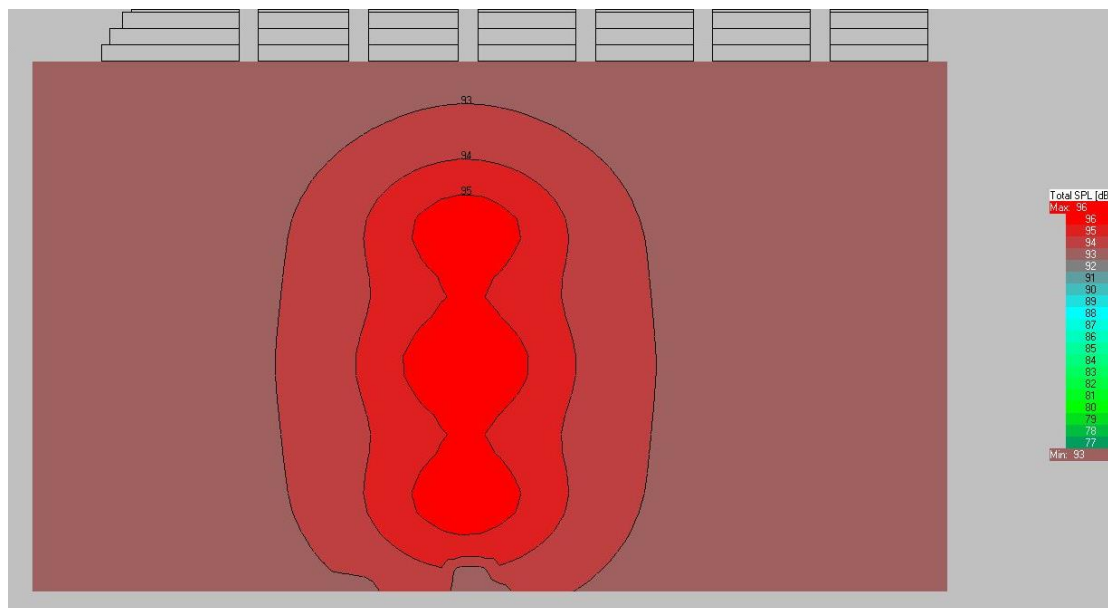


Figura 7.16. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 1 kHz.

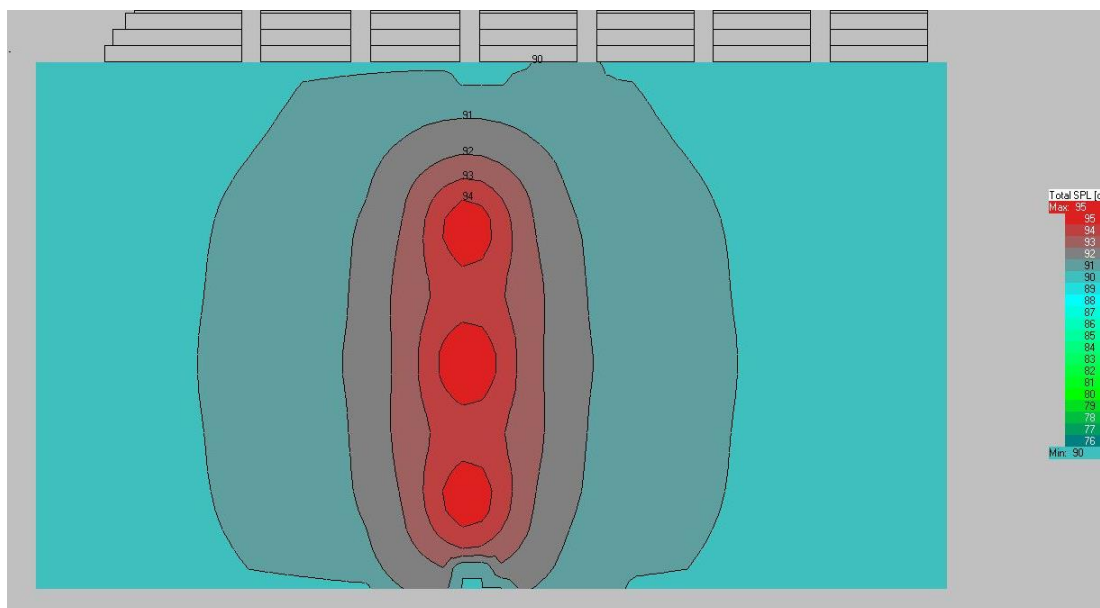


Figura 7.17. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 2 kHz.

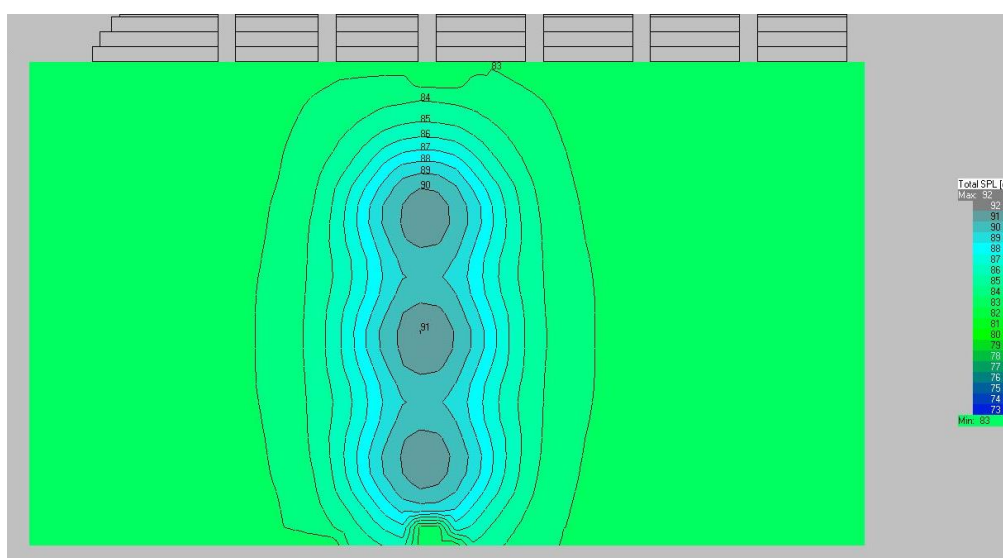


Figura 7.18. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio central para la banda de octava de 4 kHz.

A la vista de los resultados, se observa un campo sonoro uniforme y sin grandes diferencias de nivel para la zona de la división del tercio central.

#### 7.4.2.3. Refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo

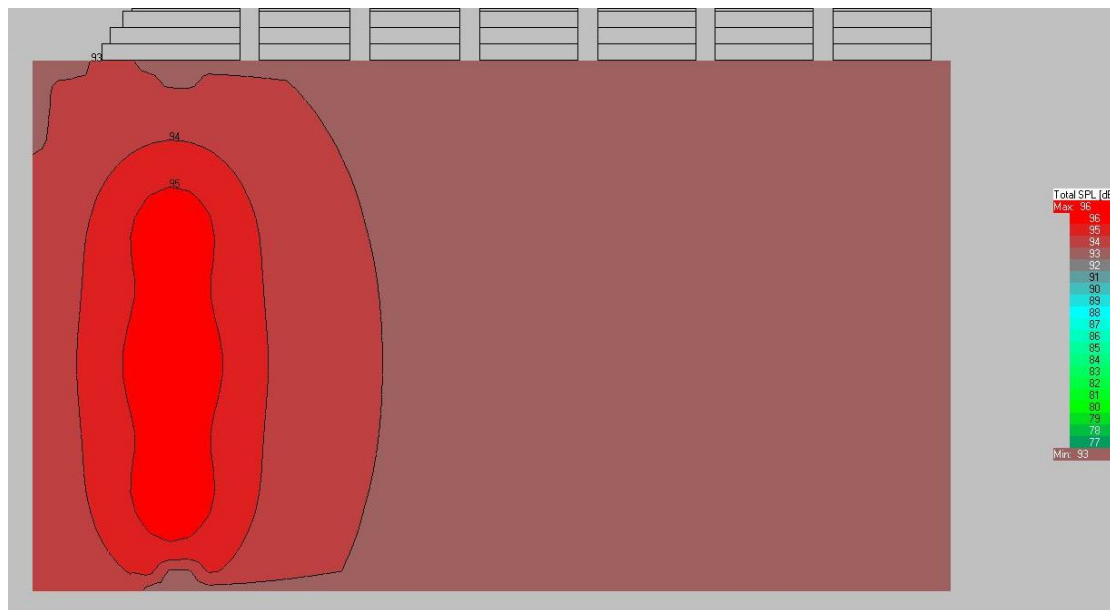


Figura 7.19. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 500 Hz.

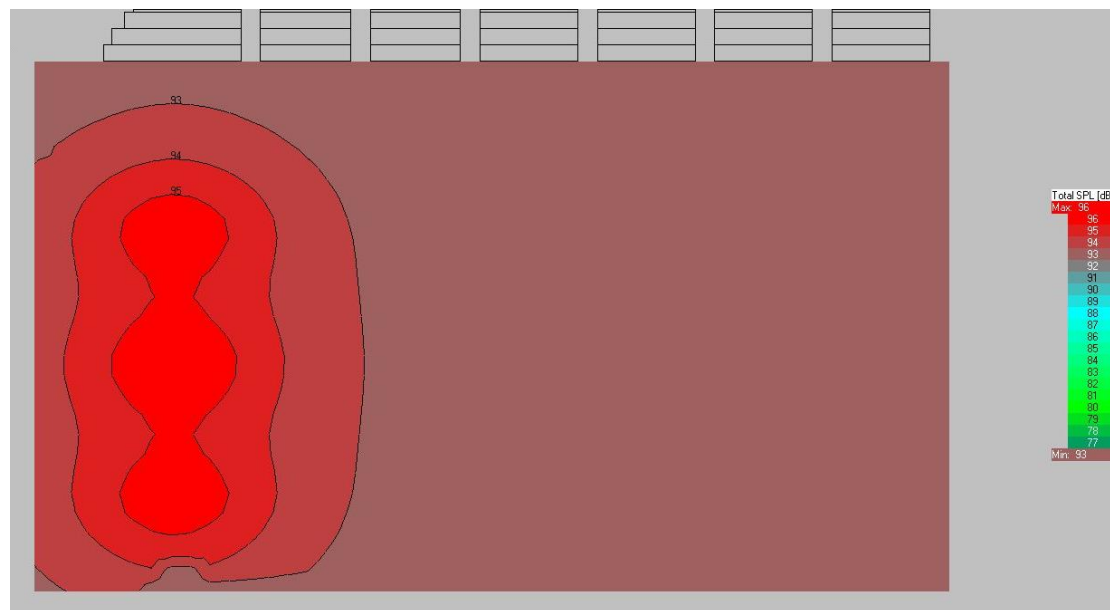
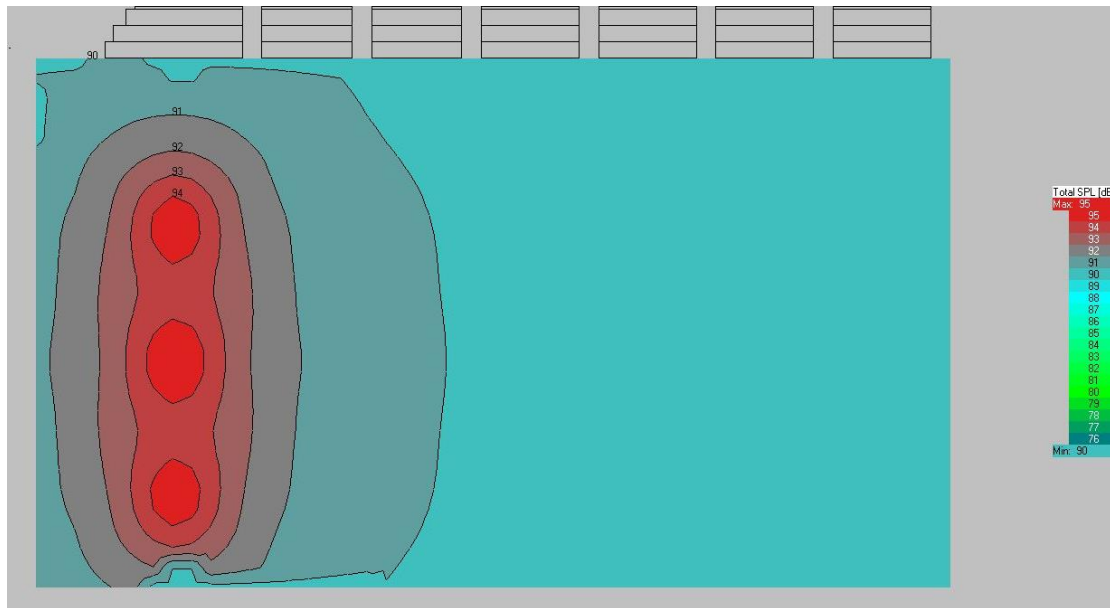
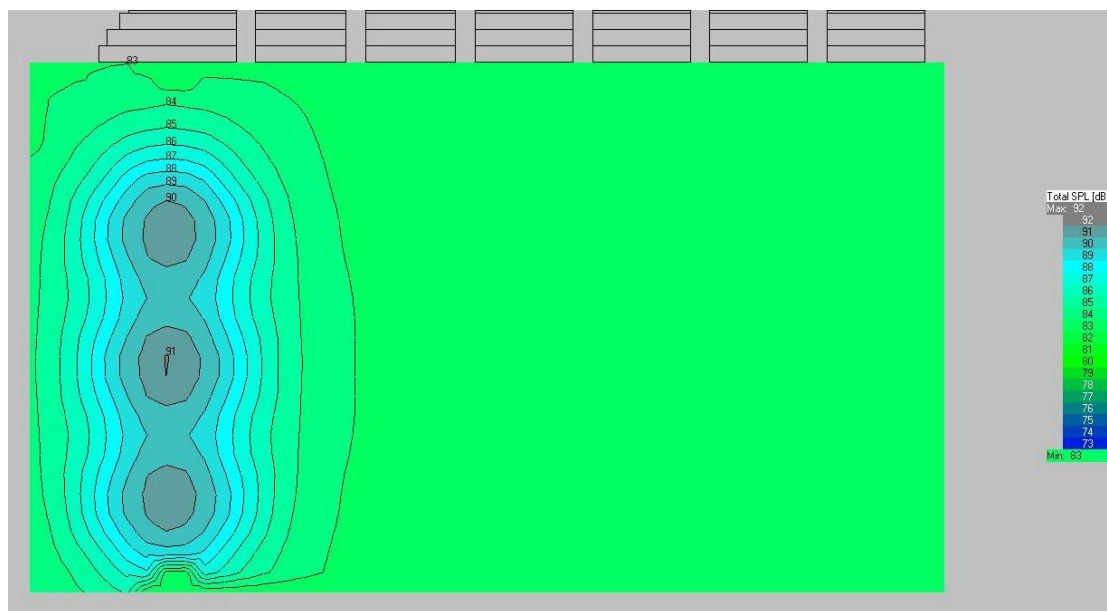


Figura 7.20. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 1 kHz.



*Figura 7.21. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 2 kHz.*



*Figura 7.22. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral izquierdo para la banda de octava de 4 kHz.*

Al igual que en la zona de la división del tercio central, la división lateral izquierda presenta un campo sonoro uniforme para las bandas de interés.

#### 7.4.2.4. Refuerzo sonoro del tercio lateral derecho

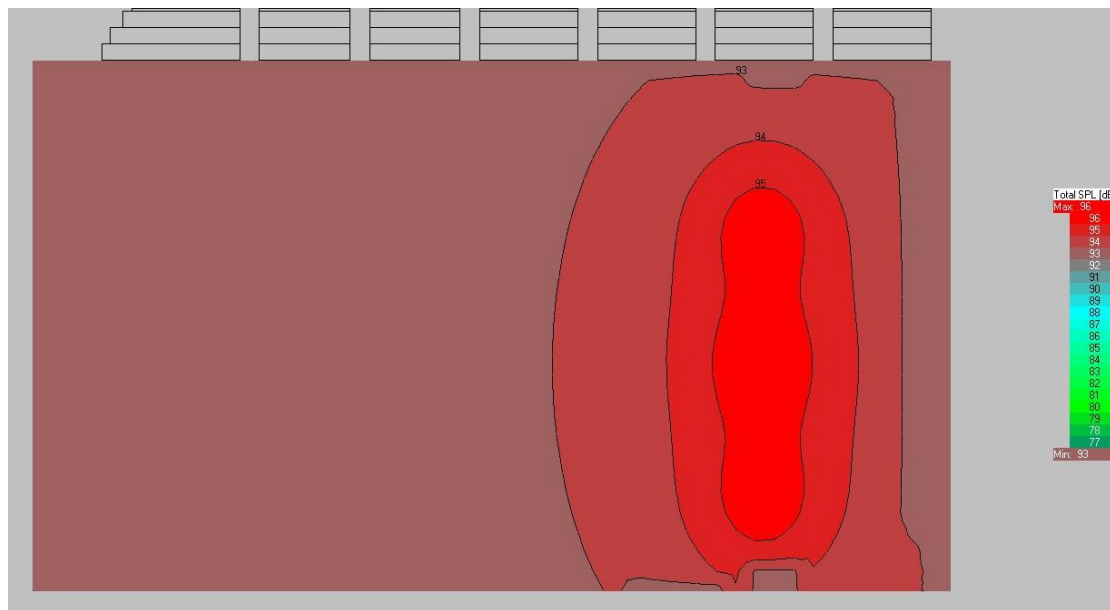


Figura 7.23. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 500 Hz.

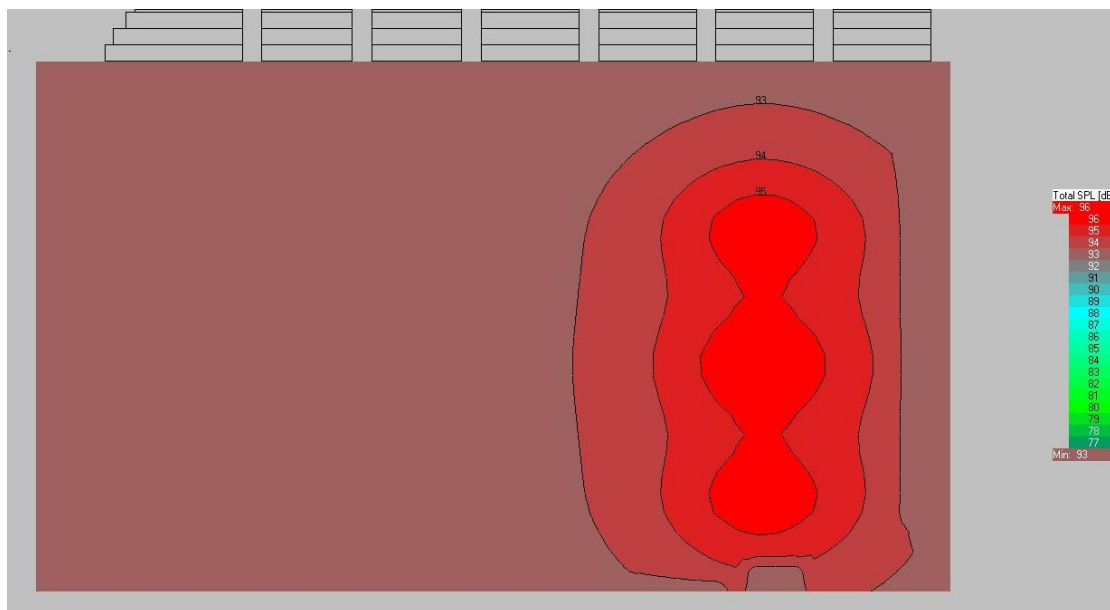
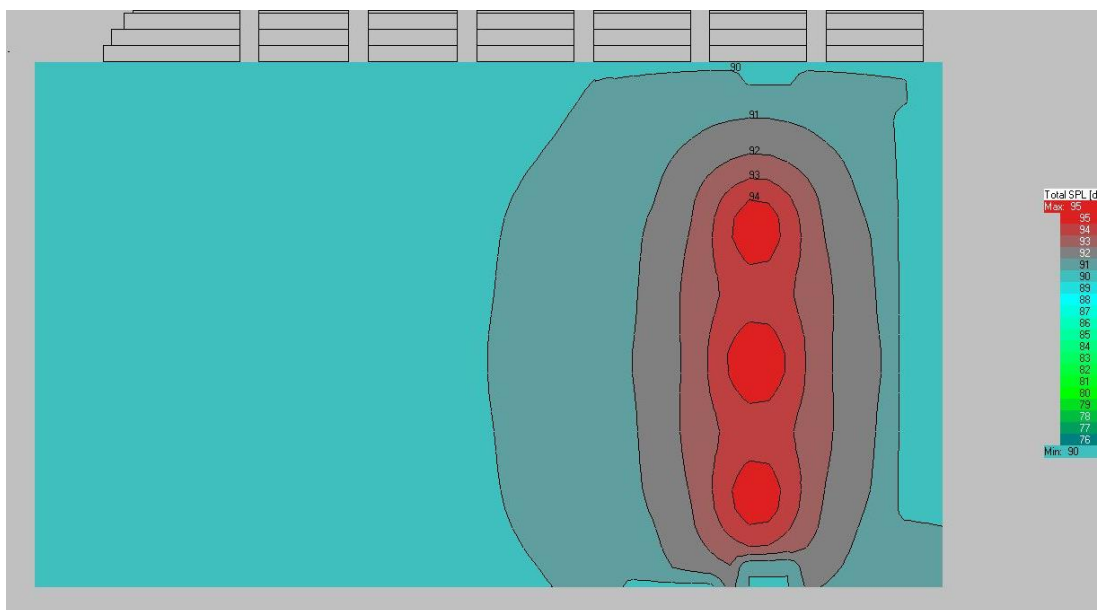
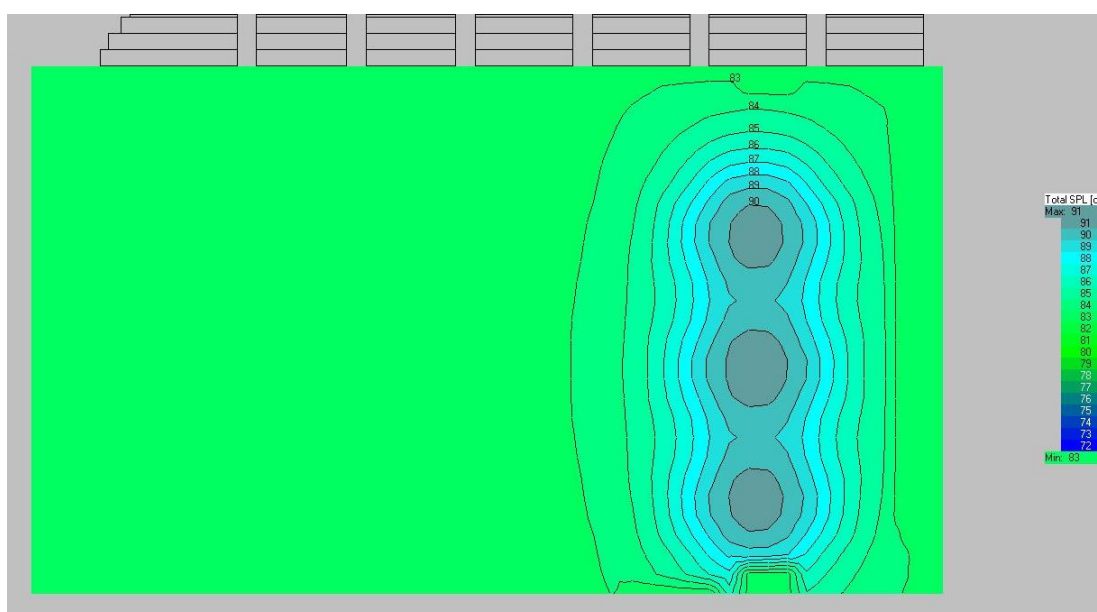


Figura 7.24. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 1 kHz.



*Figura 7.25. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 2 kHz.*



*Figura 7.26. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro del tercio lateral derecho para la banda de octava de 4 kHz.*

La zona destinada a la división lateral derecha presenta también un campo sonoro uniforme.

#### 7.4.2.5. Refuerzo sonoro de la pista completa

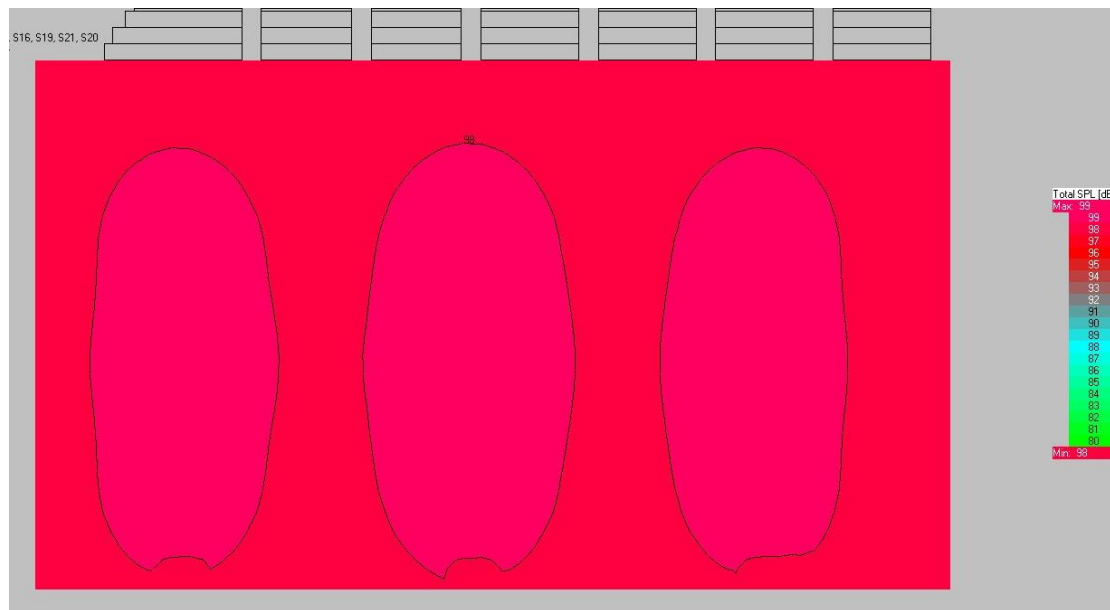


Figura 7.27. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 500 Hz.

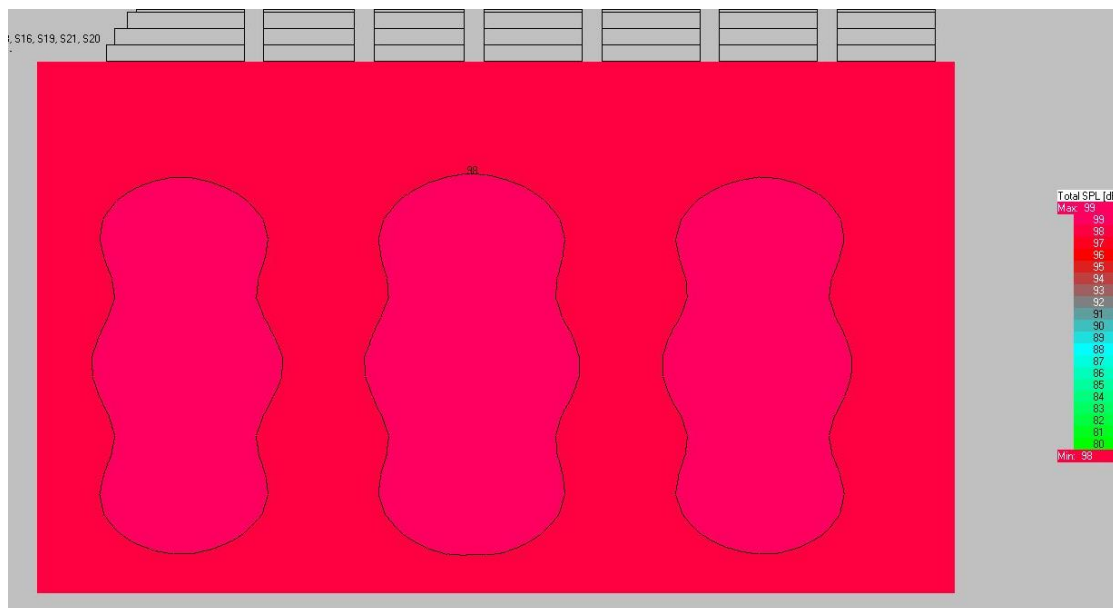


Figura 7.28. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 1 kHz.

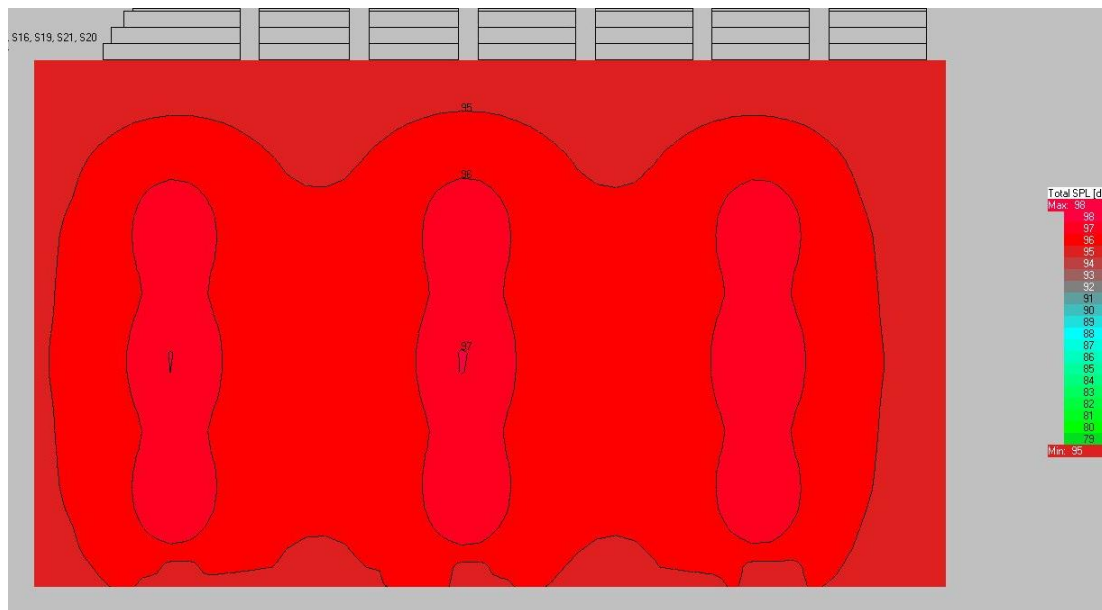


Figura 7.29. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 2 kHz.

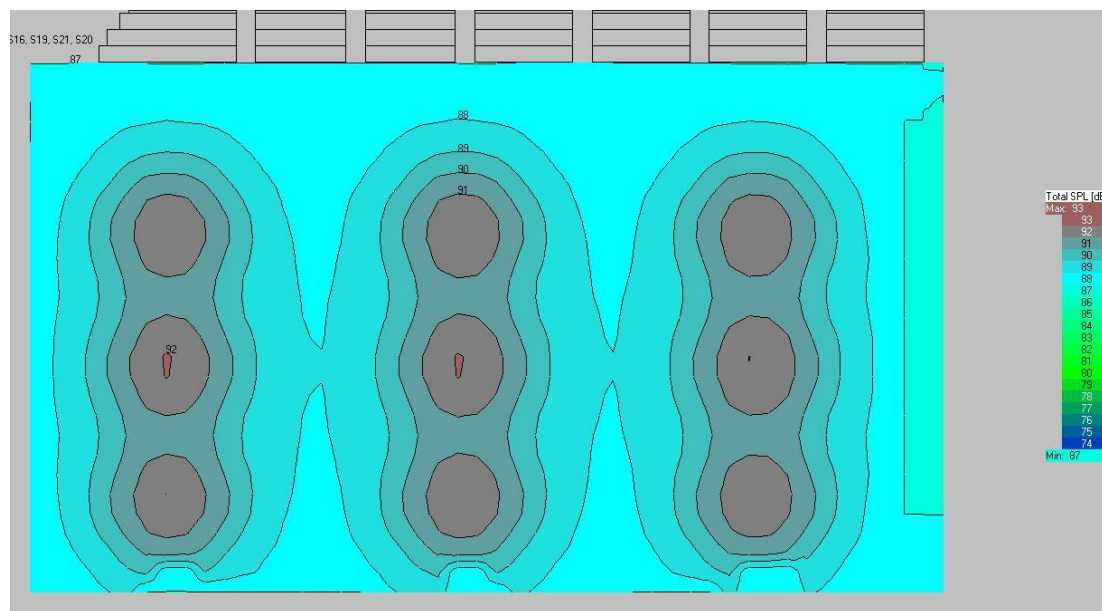


Figura 7.30. SPL total en la pista con el refuerzo sonoro de la pista completa para la banda de octava de 4 kHz.

Los resultados muestran una clara homogeneidad en el campo sonoro creado en la pista con el refuerzo sonoro diseñado para la configuración de pista completa.

## 7.5. Parámetros de inteligibilidad

En este apartado se muestran los parámetros obtenidos de %ALCons y STI para cada uno de los refuerzos sonoros con el fin de analizar los resultados y analizar sus prestaciones en cuanto a la inteligibilidad requerida en este tipo de recintos.



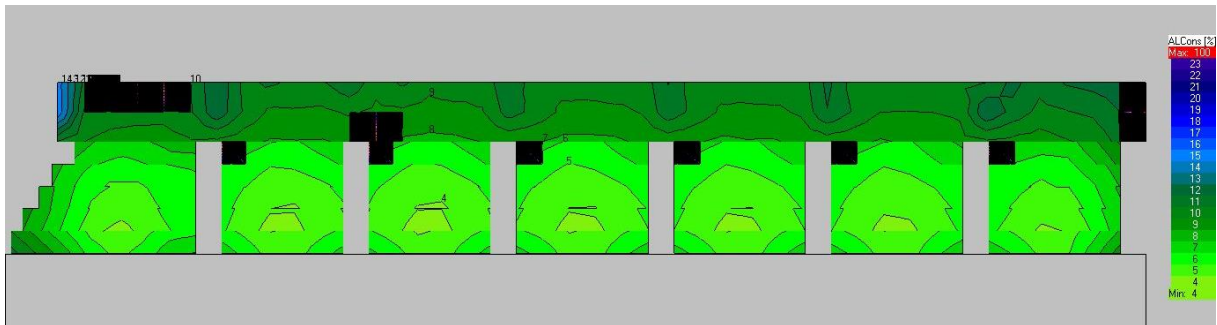
Los valores recomendados para recintos cerrados de uso deportivo son:

- $\%ALCons \leq 11.4\%$
- $STI \geq 0.5$

#### 7.5.1. **%ALCons**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de %ALCons con los diferentes refuerzos sonoros utilizados para cada zona.

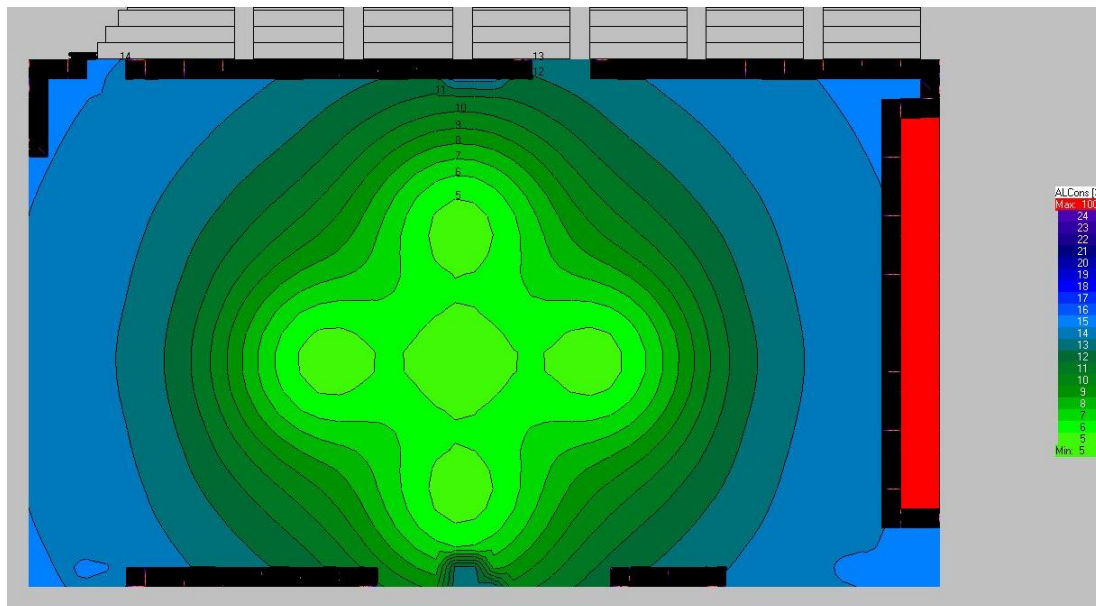
##### 7.5.1.1. **Refuerzo sonoro para las gradas**



*Figura 7.31. Valores de %ALCons para las gradas.*

Los valores de %ALCons obtenidos en las gradas son bastante buenos, logrando el objetivo de encontrarse por debajo del 11.4% en la mayoría de los puntos.

##### 7.5.1.2. **Refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica**



*Figura 7.32. Valores de %ALCons para las exhibiciones de gimnasia rítmica.*

Los resultados obtenidos cumplen con el criterio establecido para la zona en la que se llevan a cabo las exhibiciones de gimnasia rítmica.

### 7.5.1.3. Refuerzos sonoros de las divisiones de la pista

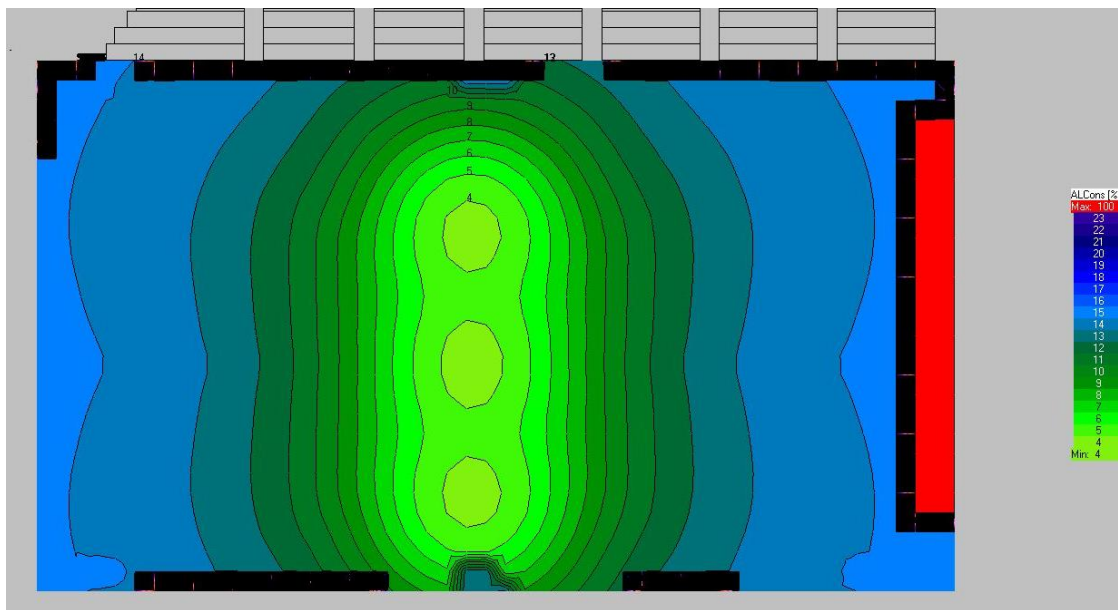


Figura 7.33. Valores de %ALCons para el tercio central.

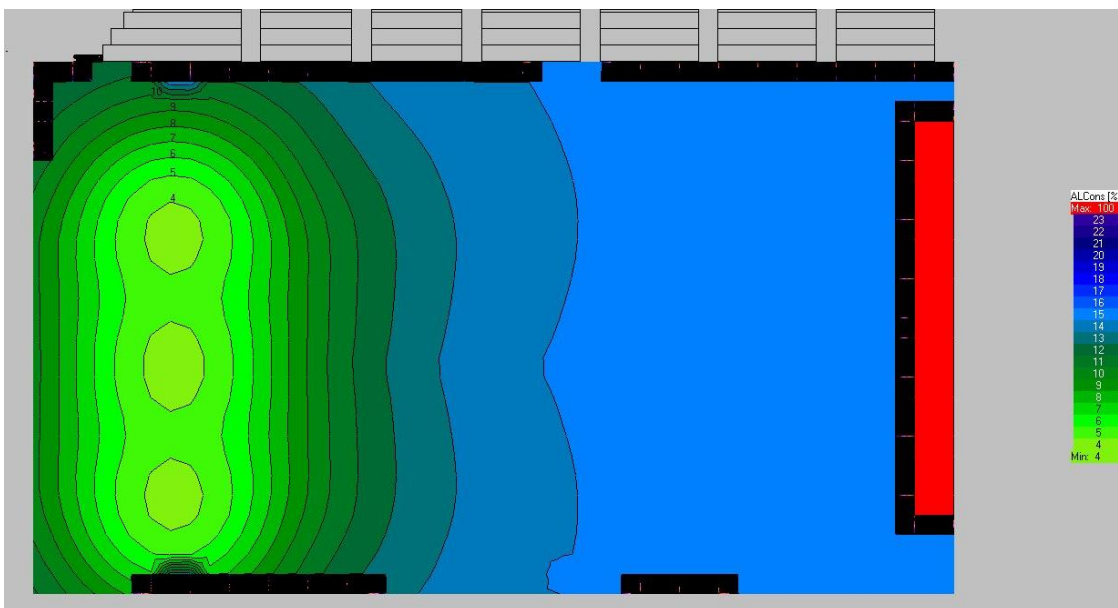


Figura 7.34. Valores de %ALCons para el tercio lateral izquierdo.

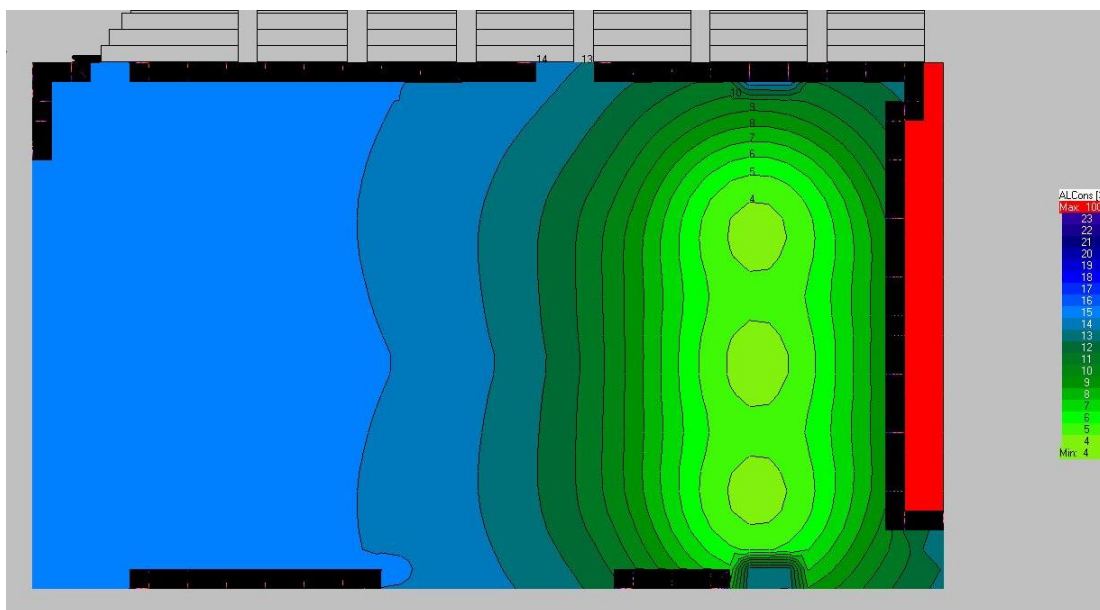


Figura 7.35. Valores de %ALCons para el tercio lateral derecho.

Los valores obtenidos de %ALCons para cada una de las configuraciones cumplen con el requisito de estar por debajo de 11.4%.

#### 7.5.1.4. Refuerzo sonoro de la pista completa

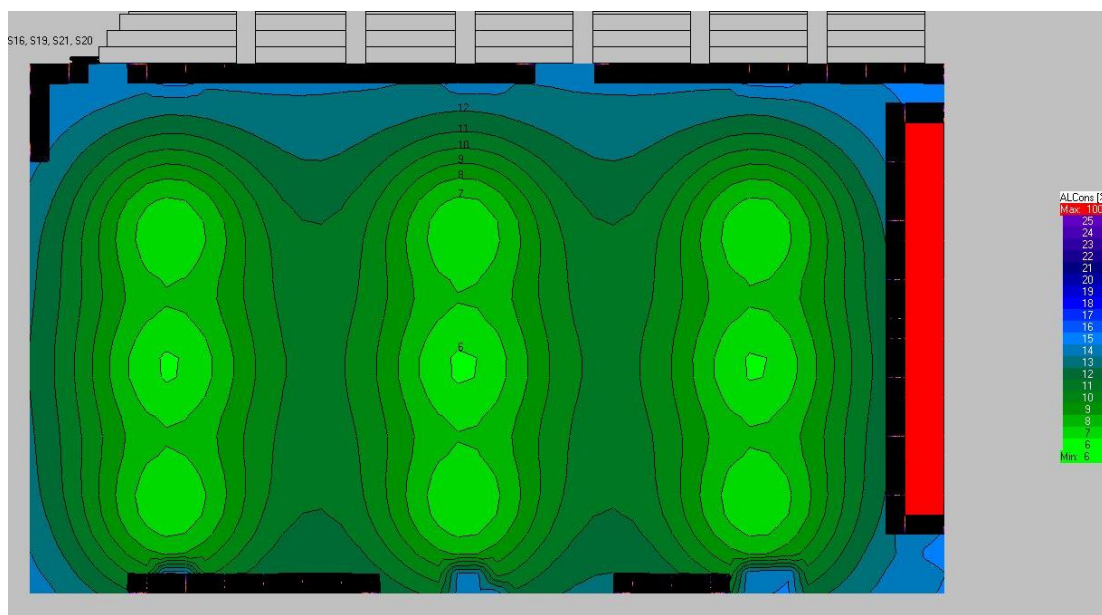


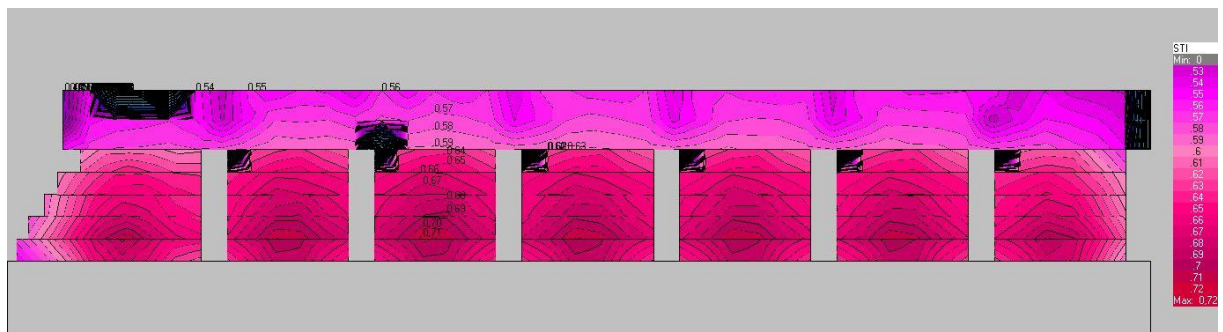
Figura 7.36. Valores de %ALCons para la pista completa.

Los valores se mantienen por debajo de 11.4% para prácticamente la totalidad de la parte útil de la pista.

#### 7.5.2. STI

En este apartado se muestran y se analizan los valores obtenidos de STI con los diferentes refuerzos sonoros utilizados para cada zona.

### 7.5.2.1. Refuerzo sonoro para las gradas



*Figura 7.37. Valores de STI para las gradas.*

Los valores de STI están por encima de 0.5 para toda la zona de asientos, por lo que se puede determinar que los valores obtenidos cumplen con el objetivo.

### 7.5.2.2. Refuerzo sonoro para exhibiciones de gimnasia rítmica



*Figura 7.38. Valores de STI para las exhibiciones de gimnasia rítmica.*

Los valores obtenidos de STI en la zona destinada a las exhibiciones de gimnasia rítmica cumplen con el objetivo de estar por debajo de 0.5.



### 7.5.2.3. Refuerzos sonoros de las divisiones de la pista

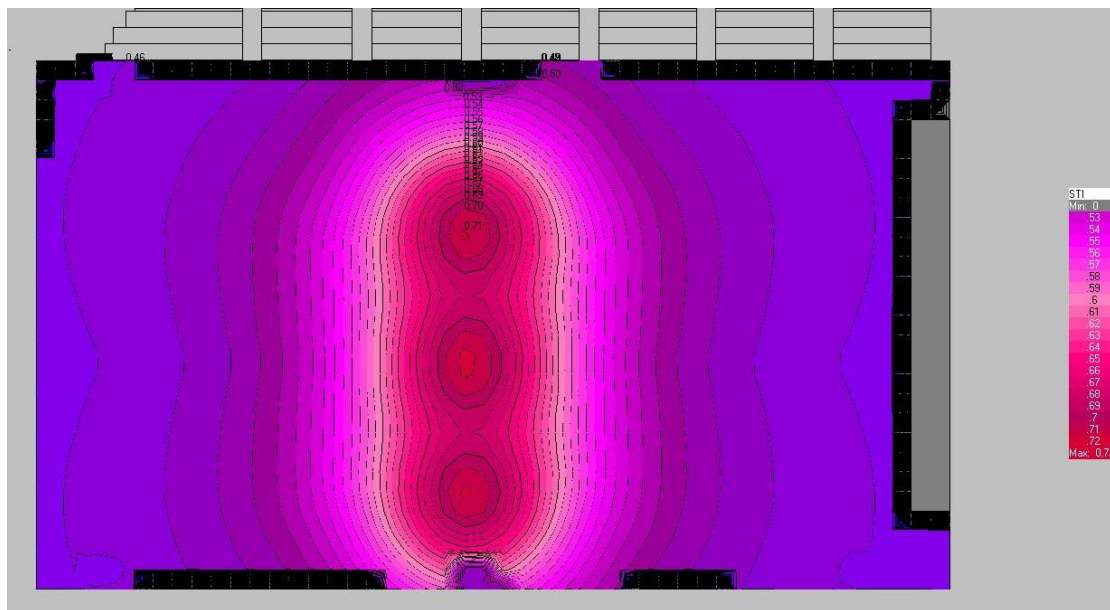


Figura 7.39. Valores de STI para el tercio central.

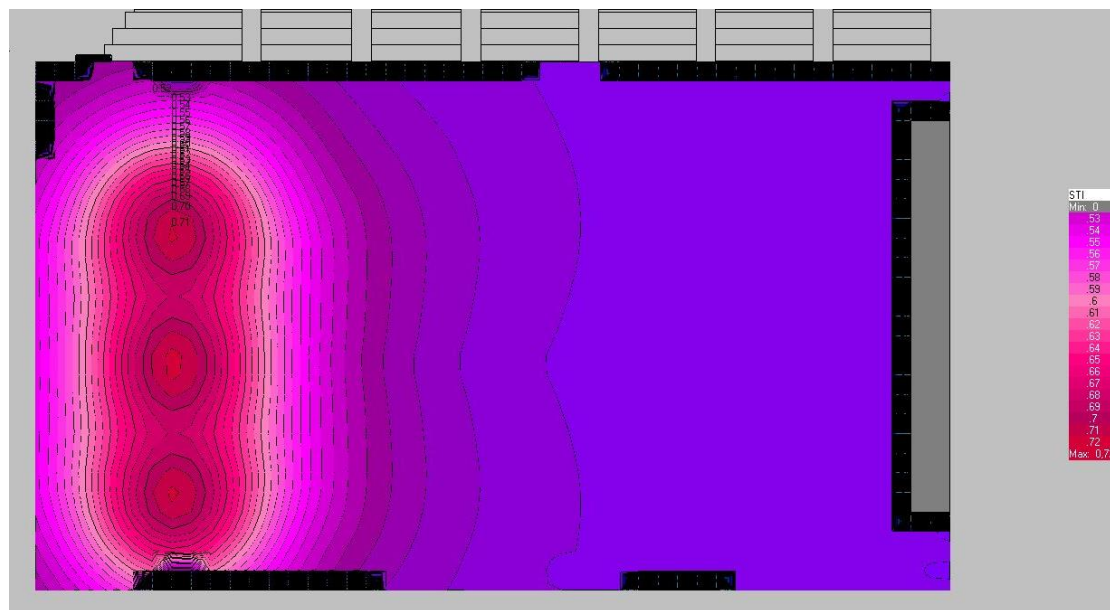


Figura 7.40. Valores de STI para el tercio lateral izquierdo.

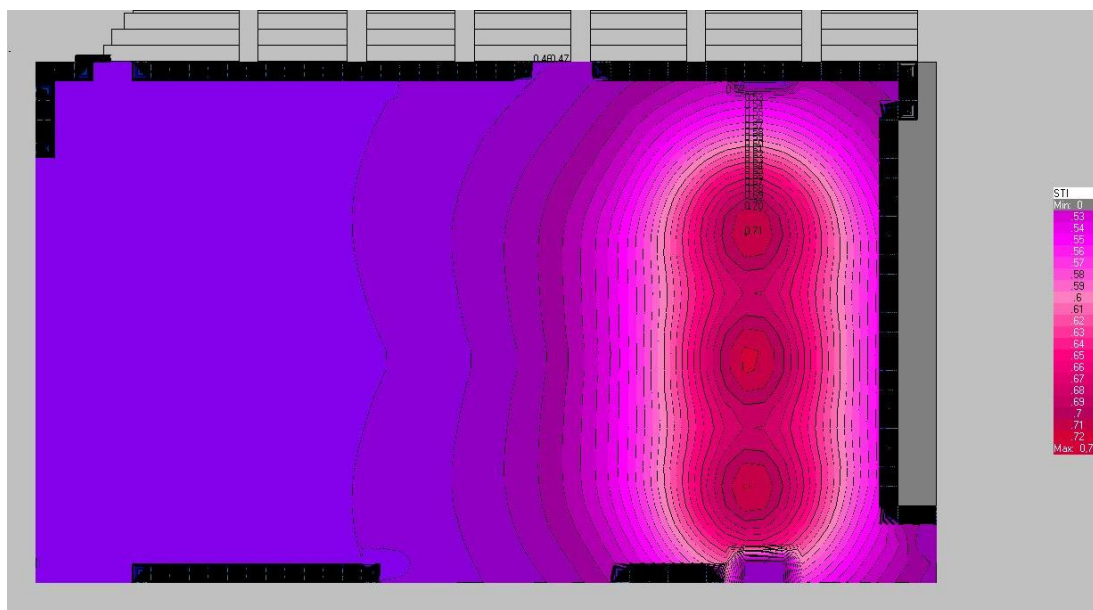


Figura 7.41. Valores de STI para el tercio lateral derecho.

Los valores de STI cumplen para cada una de las configuraciones con el criterio establecido.

#### 7.5.2.4. Refuerzo sonoro de la pista completa

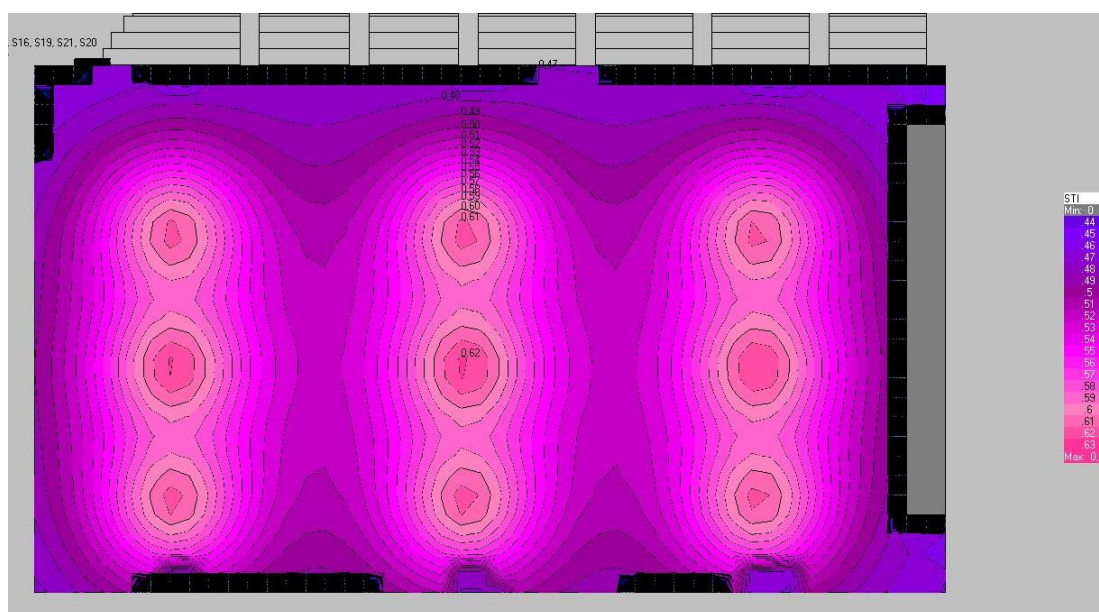


Figura 7.42. Valores de STI para la pista completa.

Los valores obtenidos de STI cumplen con creces el requisito impuesto.

## 7.6. Análisis de los resultados

Tras analizar los resultados obtenidos de tiempos de reverberación se puede concluir que son susceptibles de ser mejorados en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 200 Hz y 2.5 kHz. Esta mejoría se podría lograr mediante un tratamiento acústico con materiales absorbentes, a fin de lograr un decaimiento más rápido del campo sonoro.

En lo que respecta al campo sonoro generado en el recinto, se observa uniformidad para las zonas y las bandas de interés, no existiendo diferencias notables de nivel dentro de una misma zona específica.

En cuanto a la inteligibilidad, a la vista de los resultados tanto de %ALCons como de STI, se puede concluir que, por lo general, se alcanza una inteligibilidad bastante buena con cada una de las sonorizaciones propuestas. Sin embargo, se esperaría una mejora en dicha inteligibilidad si se aplicara un tratamiento acústico con materiales absorbentes al recinto, el cual daría lugar a una reducción de los niveles de campo reverberante, mejorando así la inteligibilidad. Cabe citar que, a diferencia de otras aplicaciones donde se realizan sonorizaciones, no es posible intentar mejorar la inteligibilidad aumentando la relación entre campo directo y campo reverberante acercando mucho los altavoces a la audiencia, puesto que podría entorpecer el desarrollo de la actividad deportiva (sobre todo en la zona de pista).

## 8. Conclusiones y trabajos futuros

Este trabajo ha consistido en realizar una propuesta de sonorización para el Polideportivo Ignacio Pinedo, ubicado en el Campus de Getafe de la Universidad Carlos III de Madrid, basado en un modelo software del recinto. Para ello, fue necesario establecer los objetivos que había de cumplir tal sonorización, llevando a cabo un análisis de los requisitos que ha de cumplir una sonorización de un recinto cerrado destinado a uso deportivo.

Tras este análisis se fijaron una serie de objetivos que se exponen a continuación:

- Inteligibilidad de la palabra: para garantizar una correcta inteligibilidad se impuso como objetivo lograr un valor del parámetro %ALCons menor o igual a 11.4% y un valor del parámetro STI mayor o igual a 0.5.
- Relación señal/ruido: el valor establecido como objetivo fue lograr un nivel de relación señal ruido de 25 dB, también con el fin de poder garantizar una correcta inteligibilidad.
- Cobertura uniforme: mediante esta condición se pretende lograr una cobertura homogénea que garantice una diferencia menor a  $\pm 3$  dB en las bandas de octava de 500 Hz a 2 kHz. Este objetivo se impuso sólo para las zonas del recinto donde era importante no sólo la inteligibilidad de la palabra, sino también una correcta escucha de la música.

En relación a las posibles áreas de audiencia que incluyeran receptores de la sonorización, se considera que el recinto consta de dos partes diferenciadas, las gradas y la pista. Por esta razón fue necesario diseñar diferentes refuerzos sonoros que cumpliesen con los objetivos impuestos para cada zona.

Para la zona de gradas, los objetivos establecidos fueron lograr una correcta inteligibilidad, por lo era necesario cumplir con los valores establecidos de %ALCons y STI y de relación señal/ruido, y lograr una cobertura uniforme.

Para la zona de pista fue necesario analizar sus diferentes configuraciones, así como las diferentes actividades deportivas que se llevan a cabo. Por ello, se decidió dividir el refuerzo sonoro en tres partes diferenciadas que pudiesen actuar tanto individualmente como en conjunto. Estas partes fueron:

- Zona central de la pista, donde se realizan exhibiciones de gimnasia rítmica.
- Divisiones laterales, donde se celebran competiciones de voleibol y bádminton.
- Pista completa, donde se llevan a cabo las competiciones de fútbol sala y baloncesto.

En la zona en la que tienen lugar las exhibiciones de gimnasia rítmica se impusieron los objetivos de lograr una correcta inteligibilidad (%ALCons, STI y relación señal/ruido) y una cobertura uniforme. Para el resto de zonas se impuso solamente el objetivo de lograr una correcta inteligibilidad.

Tras establecer estos objetivos diferenciados para cada zona, se procedió al diseño de los diferentes refuerzos sonoros mediante EASE Focus, y posteriormente se comprobaron sus prestaciones en un entorno más similar a la realidad mediante EASE, en el cuál se había modelado el recinto. Los resultados fueron los siguientes:



- Se consiguió garantizar una correcta inteligibilidad en todas las zonas del recinto, cumpliendo con los valores establecidos para los parámetros %ALCons, STI y relación señal/ruido.
- Se logró proporcionar una cobertura uniforme a las zonas en las que se había establecido tal objetivo, las gradas y la zona de la pista en la que se llevan a cabo las exhibiciones de gimnasia rítmica.

En la simulación también se obtuvieron también los valores de los tiempos de reverberación del recinto, y se observó que los resultados eran bastante altos en el margen de frecuencias comprendido entre las bandas de tercio de octava de 200 Hz y 2.5 kHz.

A continuación, se exponen los posibles trabajos futuros a realizar:

- Realizar el ajuste del modelo con la herramienta de cálculo de niveles de presión sonora basado en el trazado de rayos y comprobar si se mejoran los resultados obtenidos mediante el método estadístico.
- Obtener medidas 'in situ' de los niveles de ruido de fondo generados por el público durante las competiciones, tanto en las gradas como en la pista, para utilizarlos en la simulación de los niveles de relación señal/ruido y de los parámetros para medir la inteligibilidad.
- Obtener resultados 'in situ' de las medidas del tiempo de reverberación, para poder realizar el ajuste del modelo con otra magnitud adicional, y, además, poder guiar en la propuesta de acondicionamiento acústico.
- Estudiar el tratamiento del recinto con materiales absorbentes para reducir los tiempos de reverberación y mejorar, aún más, la inteligibilidad.
- Comprobar el comportamiento de los refuerzos sonoros de las divisiones de la pista con las cortinas divisorias desplegadas, aunque a priori no parece tarea sencilla, puesto que el software EASE simula reflexiones, no pudiendo representar la posible situación de transmisión acústica a través de las cortinas.
- Analizar el comportamiento del funcionamiento conjunto del refuerzo sonoro de las gradas con cada uno de los refuerzos de la pista, a fin de comprobar cómo interactúan y estudiar los posibles ajustes a realizar.
- Una vez realizados estos trabajos futuros, con los que se pretende completar y mejorar en algunos aspectos esta propuesta de sonorización, proponer un proyecto de instalación del refuerzo sonoro diseñado.

## 9. Marco regulador y entorno socio-económico

### 9.1. Marco regulador

El marco regulador que aplica a este trabajo está relacionado, principalmente, con los valores límite de exposición al ruido, ya que propone un refuerzo sonoro y los niveles de emisión del mismo no deben alcanzar valores excesivos que puedan suponer un riesgo para la salud de las personas presentes en el recinto.

En España no existe ninguna normativa referente a los valores límite de exposición al ruido, por lo que es necesario basarse en las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los valores límite recomendados por la OMS están recogidos en el documento *Community Noise*, preparado para la OMS y publicado en 1995 por la Stockholm University y el Karolinska Institute. En este documento se establece el valor de 100 dB(A) en valor límite a partir del cual se produce incomodidad auditiva, valor que alcanza hasta los 130 dB(A). Valores superiores a 130 dB(A) implican daños físicos, como, por ejemplo, perforación del tímpano.

Por otra parte, a pesar de no existir ninguna normativa en referencia a la obtención de las medidas necesarias para llevar a cabo el ajuste del modelo, éstas se obtuvieron basándose en el RD1367/2007 (Real Decreto 1367/2007 Reglamento de la Ley del Ruido). El cálculo de la incertidumbre de estas medidas se llevó a cabo basándose en la guía GUM (Guide to the Expression in Measurement).

### 9.2. Presupuesto

A continuación, se ofrece un desglose detallado del coste de los materiales necesarios para llevar a cabo este trabajo, aplicando la amortización correspondiente en función del tiempo de uso de cada uno de ellos.

Item	Coste unidad	Nº ud.	Amortización	Total
Licencia EASE	1760€	1	2%	35.2€
Metro láser	140€	1	2%	2.8€
Fuente dodecaédrica	2590€	1	1%	25.9€
Analizador sonoro	7770€	2	1%	155.4€
Calibrador	957€	1	1%	9.6€
Generador de ruido rosa	359€	1	1%	3.6€
Amplificador	1432€	1	1%	14.3€
<b>Total</b>				<b>246.8€</b>

Tabla 9.1. Presupuesto del material necesario para llevar a cabo el trabajo.

El software EASE Focus no se incluye en el presupuesto al ser gratuito. Las licencias del resto de software utilizados, Excel y Matlab, tampoco se incluyen al disponerse bajo licencia de estudiante de la Universidad Carlos III.

A continuación, se detalla el coste de mano de obra necesaria para la realización de este trabajo.

Item	Precio hora	Nº de horas	Nº ud.	Total
Ingeniero encargado del diseño	15€/hora	1920 horas	1	28800€
Ingenieros que llevaron a cabo las mediciones 'in situ'	15€/hora	5 horas	3	225€
<b>Total</b>				<b>29025€</b>

*Tabla 9.2. Presupuesto de la mano de obra necesaria para llevar a cabo el trabajo.*

Por último, se muestra el presupuesto completo de la realización de este trabajo.

Item	Coste
Material	246.8€
Mano de obra	29025€
<b>Total</b>	<b>29271.8€</b>

*Tabla 9.3. Presupuesto de la realización del trabajo.*

### **9.3. Impacto socio-económico**

La instalación de un refuerzo sonoro de estas características aumenta la calidad de los eventos deportivos celebrados en el Polideportivo Ignacio Pinedo, lo que puede hacer que la afluencia de público se vea incrementada. Esto puede generar también un efecto llamada a competiciones deportivas de más importancia y prestigio, permitiendo que el polideportivo llegue a ser un recinto importante del sur de la Comunidad de Madrid.

El desarrollo de este trabajo puede tener también un impacto socio-económico positivo en el entorno geográfico del Campus de Getafe de la Universidad Carlos III de Madrid.

El hecho de disponer de un sistema de refuerzo sonoro bien diseñado abre un abanico de posibilidades en cuanto a los eventos que pueden celebrarse en el Polideportivo Ignacio Pinedo, no limitándose sólo a competiciones deportivas, con las consecuencias económicas que esto supone para su entorno geográfico.

La versatilidad del sistema empleado, junto con el tamaño del recinto, permiten la celebración no sólo de eventos deportivos, sino también de espectáculos de danza, conciertos, congresos, etc. La posibilidad de albergar todo tipo de eventos incrementa la afluencia de público en el entorno geográfico cercano al recinto, con los beneficios económicos que esto puede suponer para la hostelería y diferentes servicios, como la ocupación de hoteles.

Esta ampliación de la utilidad del recinto también puede generar un aumento de puestos de trabajo durante la celebración de eventos, ya que son precisos operarios de montaje, servicio de catering, etc.

## **Bibliografía**

### **Capítulo 2:**

Recuero López, M. (2001). *Acondicionamiento acústico*. Madrid: Paraninfo.

Recuero López, M. y Gil González, C. (1993). *Acústica arquitectónica* (2ª ed.). Madrid: Paraninfo

Arau Puchades, H. (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: Ceac

Beranek, Leo L. (1969). *Acoustics*. (A. Di Marco, Trans.). Buenos Aires: Editorial Hispano Americana (Trabajo original publicado en 1954)

### **Capítulo 3:**

Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Ediciones UPC.

Davis, D. y Patronis Jr., E. (2006). *Sound System Engineering* (3ª ed.). Oxford: Elsevier

Jambrošić, K., Domitrović, H. y Horvat, M. (2014). *Acoustic design of large-sized sports halls in Croatia*. 6th Congress of Alps-Adria Acoustics Association 16.-17. October 2014 Graz, Austria.

Recuperado de [http://alpsadriaacoustics.org/wp-content/uploads/2015/01/Jambrosic\\_Domitrovic\\_Horvat\\_AcousticDesignOfLarge-SizedSportsHallsInCroatia.pdf](http://alpsadriaacoustics.org/wp-content/uploads/2015/01/Jambrosic_Domitrovic_Horvat_AcousticDesignOfLarge-SizedSportsHallsInCroatia.pdf)

Architects and Building Branch (2003). *Building Bulletin 93: Acoustic Design of Schools - a Design Guide*. Londres: [Education Funding Agency](http://www.education.gov.uk/pubs/eOrderingDownload/BB93-Acoustic_Design.pdf). Recuperado de [http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130320223442/https://www.education.gov.uk/pubs/eOrderingDownload/BB93-Acoustic\\_Design.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130320223442/https://www.education.gov.uk/pubs/eOrderingDownload/BB93-Acoustic_Design.pdf)

Luykx, M.P.M y Vercammen, M.L.S. (2013). Evaluation and measuring procedure for strength in sport halls. *Acoustics in Practice, International e-Journal of the European Acoustics Association (EAA)*, 1 (1), 5-6. Recuperado de <https://euracoustics.org/activities/acoustics-in-practice/issues/2013/acoustics-in-practice-issue-1-july-2013>

Berger, E.H., Neitzel, R. y Kladden, C.A. (2015). *Noise Navigator Sound Level Database with Over 1700 Measurement Values*. Recuperado de <http://multimedia.3m.com/mws/media/8885530/noise-navigator-sound-level-hearing-protection-database.pdf>

### **Capítulo 4:**

Ureda, Mark S. (2001). *Line arrays: theory and applications*. 110th Convention of Audio Engineering Society 2001 May 12-15 Amsterdam, The Netherlands. Recuperado de [http://www.jblpro.com/pub/technote/convention\\_paper\\_5304.pdf](http://www.jblpro.com/pub/technote/convention_paper_5304.pdf)

Ureda, Mark S. (2001). *"J" and "Spiral" line arrays*. 111th Convention of Audio Engineering Society 2001 September 21-24 New York, NY, USA. Recuperado de [https://www.jblpro.com/ProductAttachments/MSU\\_AES\\_Fall\\_2001\\_Monday\\_Morning.pdf](https://www.jblpro.com/ProductAttachments/MSU_AES_Fall_2001_Monday_Morning.pdf)

Davis, D. y Patronis Jr., E. (2006). *Sound System Engineering* (3ª ed.). Oxford: Elsevier

La Roda, J. (2008). *Line arrays: cómo funcionan*. Recuperado de [http://www.dasaudio.com/wp-content/uploads/2011/11/LINE\\_ARRAYS\\_COMO\\_FUNCIONAN\\_2008.pdf](http://www.dasaudio.com/wp-content/uploads/2011/11/LINE_ARRAYS_COMO_FUNCIONAN_2008.pdf)

Dijón A.G. y Ferrer P. (2015) *Configuración y ajustes de sistemas de sonido* (2ª ed.). Tarragona: Altaria

### **Capítulo 6:**

Luykx, M.P.M y Vercammen, M.L.S. (2013). Evaluation and measuring procedure for strength in sport halls. *Acoustics in Practice, International e-Journal of the European Acoustics Association (EAA)*, 1 (1), 5-6. Recuperado de <https://euracoustics.org/activities/acoustics-in-practice/issues/2013/acoustics-in-practice-issue-1-july-2013>

Cranston, C.J. (2012). *Noise characterization and exposure of indoor sporting events* (Tesis). Colorado State University, Fort Collins, Colorado. Recuperado de [https://dspace.library.colostate.edu/bitstream/handle/10217/65316/Cranston\\_colostate\\_0053N\\_10919.pdf?sequence=1](https://dspace.library.colostate.edu/bitstream/handle/10217/65316/Cranston_colostate_0053N_10919.pdf?sequence=1)

Hayne, M.J., Rumbler, R.H. y Mee, D.J. (2006). *Prediction of crowd noise*. Proceedings of ACOUSTICS 2006. 20-22 November 2006, Christchurch, New Zealand. Recuperado de [https://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/AASNZ2006/papers/p46.pdf](https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2006/papers/p46.pdf)

Noise and Sound Services (2013). *Hastings Community SportsCentre - Acoustical Assessment*. At:-Hibbard Drive. Port Macquarie. NSW 2444. July 2013. Report No. Nss 21915-Final

